

TASC



© **Tyres / Tracks And
Soil Conservation**

Guide technique

Auteurs

Etienne Diserens

Andrea Battiato

Programmation

Robert Meer

Remarques préliminaires

L'application est mise à la disposition de tous gratuitement. Elle reste cependant protégée, le droit de propriété revient exclusivement aux distributeurs.

L'utilisateur prend les mesures techniques et organisationnelles adéquates pour éviter tout abus de l'utilisation de l'outil.

TASC - Sommaire

TASC – Généralités	5
---------------------------	----------

1. Introduction	6
2. L'essentiel en bref	7
2.1. TASC, quel instrument ?	7
2.2. TASC, à quelles fins ?	7
2.3. TASC, pour quels usagers ?	8

TASC - Bases techniques	9
--------------------------------	----------

3. Module 1 - contrainte de charge et vulnérabilité du sol	10
3.1. Considérations générales	10
3.1.1. Contrainte et consistance du sol en surface	10
3.1.2. Les trois éléments-clés de l'évaluation	12
3.1.3. Concept du « risque de compactage sévère »	15
3.2. Caractéristiques des sols	15
3.2.1. Utilisation du sol	15
3.2.2. Types de sol	20
3.2.3. Humidité du sol	22
3.2.4. Consistance du sol en surface	22
3.2.5. Profondeur critique	24
3.3. Caractéristiques des machines	25
3.3.1. Type/structure des pneumatiques et des chenilles	25
3.3.2. Largeur des pneumatiques et des chenilles, diamètres des pneumatiques, longueur de la bande de roulement	26
3.3.3. Charge à la roue et à la chenille	28
3.3.4. Pression de gonflage	28
3.3.5. Surface de l'empreinte, pression de contact moyenne	29
3.3.6. Nombre de passages	31
3.3.7. Vitesse	31
3.4. Validation	32

4. Module 2 – traction, énergie et patinage	34
4.1. Considérations générales	34
4.1.1 Détermination de l'interface sol-pneumatique - surface de l'empreinte	35
4.1.2 Répartition des contraintes sur la surface de l'empreinte et patinage	38
4.1.3 Force totale, force de traction, couples et puissance	41
4.1.4 Puissance du moteur et consommation de carburant	43
4.1.5 Charge dynamique et transfert de charge	45
4.1.6 Vulnérabilité du sol en surface et seuil de cisaillement	46
4.2. Caractéristiques du sol – tests au champ	49
4.2.1 Profondeur de l'ornière	50
4.2.2 Test de la houe	51
4.2.3 Test tactile	56
4.2.4 Test du tournevis	57
4.3. Caractéristiques du tracteur	58
4.3.1 Largeur et diamètre des pneumatiques, circonférence de roulement	58
4.3.2 Pression de gonflage, diamètre des jantes	59
4.3.3 Charge à la roue	60
4.3.4 Empattement et hauteur de l'attelage	60
4.4. Validation	61
4.4.1 Surface de l'empreinte	61
4.4.2 Courbe de traction-patinage	62
4.4.3 Consommation de carburant	63
4.4.4 Vulnérabilité du sol en surface et seuil de cisaillement	65
5. Nomenclature	67
6. Bibliographie	69
7. TASC dans la presse spécialisée	72
<hr/>	
TASC – Annexes	73
<hr/>	
<i>Annexe 1 - recommandations pratiques pour protéger le sol</i>	74
<i>Annexe 2 - ordinogramme</i>	76
<i>Annexe 3 - principe d'appréciation des risques de dégradation de la structure du sol</i>	77
<i>Annexe 4 - évaluation de la charge statique maximale par essieu pour les tracteurs</i>	79
<i>Annexe 5 – prépondérance</i>	81
<i>Annexe 6 – formulaires pour tests et relevés au champ</i>	83

TASC – Généralités

□

1 Introduction

Dès le milieu des années 1980, l'utilisation de machines en commun a pris un essor considérable, ceci par souci d'abord de rationalisation. L'efficacité, le rendement et par là-même le poids des machines forestières et agricoles allant du tracteur aux intégrales de récoltes ont considérablement augmenté. Les charges à la roue atteignent jusqu'à 5 tonnes pour les tracteurs, 6 tonnes pour les abatteuses et plus de 10 tonnes pour les moissonneuses-batteuses et les récolteuses de betteraves sucrières. Avec des poids totaux de 30 tonnes pour les porteurs forestiers et de plus de 50 tonnes pour les récolteuses de betteraves sucrières (volume de trémie atteignant 40 m³), que l'on observe les charges les plus élevées parmi les machines forestières et agricoles [1, 2]. La protection des sols n'a cessé de gagner en importance depuis le début des années quatre-vingt dix. C'est sous l'horizon arable des sols agricoles, sous la couche organique des sols forestiers que le risque de compactage sévère est le plus aigu, là où aucun outil d'ameublissement ne peut intervenir. Le cisaillement du sol en surface dû au patinage de la roue dégrade également le sol. A cela, s'ajoute le transfert de charge de l'essieu avant vers l'essieu arrière, lors d'un effort de traction venant accentuer les risques de compactage.

En présence de contraintes démesurées, l'approvisionnement en eau, en air, en chaleur et en éléments nutritifs du sol n'est plus équilibré. Le compactage du sol rend l'infiltration de l'eau difficile ; la fréquence et la gravité des inondations s'intensifient. Le ruissellement de surface favorise l'érosion. La dégradation des sols se manifestent surtout lors de conditions météorologiques extrêmes (pluie sur une période prolongée, sécheresse, froid persistant) avec effet négatif sur la fertilité entraînant des baisses de rendements. Dans l'agriculture, on estime les pertes dues à la compaction entre 5 et 15% [3, 4]. En sylviculture, il faut s'attendre à une perte de productivité de 6 à 16 % des réserves de bois dans la prochaine génération [5].

En Suisse, la protection physique des sols est légiférée dans l'ordonnance OSol du 1.7.1998. Elle traite le compactage et l'érosion du sol. Le principe de prévention prévaut.

L'application TASC (Tyres And Soil Conservation) est une réponse à cette problématique ; c'est un outil simple, efficace, permettant au praticien de trouver rapidement des solutions de protection tenant compte et de son parc à machine et de la structure de ses sols.

Publié en 2005 et basé sur Excel, TASC est considéré comme le premier tool de décision dans ce domaine. Dans la version TASCV4.0, deux modules, *contraintes de charge et vulnérabilité du sol* et *données techniques des pneumatiques* ont été remaniés, actualisés. Comme l'application ne se limite plus à la seule problématique de la compaction des sols, une nouvelle désignation du tool nous paraissait être judicieuse à savoir *TASC Tyres/Tracks And Soil Conservation*.

2 L'essentiel en bref

2.1 TASC, quel instrument ?

TASC (TYRES AND SOIL CONSERVATION) fait suite à l'application TYRES/TRACKS AND SOIL COMPACTION. Cette application excel conçue pour le praticien vise à faciliter les décisions relatives à la conception, à l'équipement et à l'emploi de machines et d'outils agricoles et forestiers ceci pour préserver le sol et sa structure à long terme.

Des informations numériques et graphiques permettent d'évaluer les contraintes imposées au sol (compactage sévère, cisaillement du sol, surface foulée avec passages multiples) par les pneumatiques et les chenilles, suivant les paramètres des trains de roulement, la géométrie du véhicule et les propriétés du sol. En vertu du principe de prévention, il convient de réduire au maximum les risques de compactage sévère et de cisaillement des sols agricoles et forestiers. Le risque potentiel de compactage sévère apparaît dans les zones non reprises par les outils d'ameublissement, sous les horizons organiques des prairies et sols forestiers lorsque la portance du sol est insuffisante. Le cisaillement du sol, quant à lui, se manifeste lors d'un effort de traction, lorsque la roue inflige au sol une force de cisaillement supérieure à sa résistance [6]. La valeur indicative de la densité apparente effective et la résistance au cisaillement du sol tiennent toutes deux lieu de références dans l'évaluation des atteintes [7, 8]. Les besoins en force de traction comme en énergie une fois paramétrisés peuvent être évalués. Par ailleurs, la surface foulée, non foulée comme la distribution du nombre de passages restent de précieux indices d'évaluation sur sol à structure sensible. TASC répertorie en outre les données techniques usuelles des pneumatiques agricoles et forestiers.

Pour les calculs, TASC s'appuie sur les bases mathématiques de la physique et de la mécanique des sols tout en intégrant de nouveaux algorithmes développés à partir de nombreuses mesures au champ. Par ailleurs TASC propose des tests peu onéreux, simples, efficaces et rapides pour apprécier l'état du sol au moment opportun. Une appréciation fiable des risques au « cas par cas » est dès lors possible.

Au même titre que le test à la bêche, que les tests d'infiltration ou ceux relatifs à la lutte contre l'érosion, les tests proposés par l'application TASC sont des tests complémentaires liés directement à la compaction et au cisaillement. Tous ces tests pris dans leur ensemble contribuent au mieux à la préservation de la structure du sol et de sa fertilité à long terme.

2.2 TASC, à quelles fins ?

Le choix d'un équipement, le réglage et l'engagement des machines compte tenu de l'état du sol font l'objet de préoccupations constantes pour le praticien, agricole ou forestier.

- Comment gérer la charge d'un outil de travail, la dimension d'un pneumatique (simple ou jumelé), la pression de gonflage pour éviter toute surcharge pour le sol ?
- Comment équiper et régler ses outils pour travailler un sol avec un maximum d'efficacité et d'économie ?
- Comment organiser son chantier de récolte pour préserver la structure du sol en surface et son drainage ?
- Quelles techniques opter pour le travail du sol ? – Quels impacts en termes de contrainte, d'énergie à l'échelle de la parcelle, d'une exploitation voire d'une région ?

Autant de questions devant lesquelles tout praticien, vulgarisateur se trouvent être confrontés. En ce sens, TASC est un outil d'aide à la décision. Ses fonctions sont multiples, permettant :

- Le calcul et la représentation graphique de la propagation des contraintes de charge dans le sol en fonction de la charge et de la consistance de l'horizon travaillé
- Le calcul et la représentation de la propagation des contraintes de charge pour un sol donné compte tenu de la dimension des pneumatiques ou des chenilles, de la charge à la roue ou à la chenille et de la pression de gonflage des pneumatiques
- L'évaluation du risque de compactage sévère du sol, en particulier dans le sous-sol (couche située en dessous de la profondeur maximale d'ameublissement) en fonction du type de sol, de sa consistance en surface et de la charge
- Le calcul de la contrainte de charge en un point quelconque du sol
- Le calcul de la courbe de traction-patinage avec seuil du risque de cisaillement
- Le calcul de la résistance du sol au cisaillement et de la force de traction sur les roues
- Le calcul du transfert de charge de l'essieu avant vers l'essieu arrière lors d'un effort de traction. Calcul de la charge dynamique de la roue
- Le calcul de la force de traction requise suivant l'outil traîné de travail, les propriétés du sol et la vitesse de progression
- Le calcul de l'énergie nette, l'énergie aux roues, l'énergie totale avec consommation de carburant correspondante
- Le calcul de la distribution des surfaces foulées avec le nombre relatif de passages de roue pour un, voire plusieurs chantiers culturaux successifs
- Une consultation d'une banque de données techniques de plus de 1310 pneumatiques affiliés aux secteurs agricole et forestier
- Le calcul de la charge maximale admissible à la roue en fonction de la pression de gonflage, de la vitesse
- L'évaluation des risques de dégradation du sol dans un contexte général donné – type de sol - particularisme régional – considérations techniques spécifiques de production...

2.3 TASC, pour quels usagers ?

TASC est une application conçue d'abord pour les praticiens, les entrepreneurs agricoles ou forestiers. Il s'agit d'une application « terrain » facilitant la prise de décision.

TASC est aussi d'une grande utilité pour les conseillers agricoles, enseignants, scientifiques, spécialistes de la protection des sols, planificateurs, techniciens d'entreprise et ingénieurs.

Bases techniques

3. Module 1 - contraintes de charge et vulnérabilité du sol

La portance du sol et la propagation des contraintes de charge de la surface en profondeur jouent toutes deux un rôle déterminant dans l'évaluation des risques à partir d'une profondeur ne pouvant être atteinte par les outils d'ameublissement. Quelle est alors la portance du sol puis la contrainte de charge à cette profondeur-seuil ? La contrainte de charge diminue alors que la stabilité du sol, elle, augmente avec la profondeur. En paramétrisant le sol et les machines, il est dès lors possible de calculer les contraintes de charge et la portance du sol à cette profondeur critique, puis d'évaluer à cet endroit les risques de compactage.

3.1 Considérations générales

Pour déterminer le risque de compactage sévère d'une intervention donnée sur sol forestier ou agricole, il faut être en mesure de décrire la contrainte en fonction de la charge à une profondeur donnée et la consistance du sol. Sur la base de critères reconnus [8], on définira les seuils limites de stabilité (contraintes maximales tolérées) compte tenu de la granulométrie du sol et de son humidité. Ce n'est qu'ensuite qu'une estimation du risque de compactage sévère est possible.

3.1.1 Contrainte et consistance du sol en surface

Les courbes de contrainte de charge comme les bulbes de pression des feuilles sont basés sur l'équation (éq. 1) pour sols homogènes de Boussinesq [12, 13, 14].

$$\sigma_z = \frac{2q\sigma_m}{\pi} \left[\arctan \frac{ab}{Rz} + \frac{abz}{R} \left(\frac{1}{a^2 + z^2} + \frac{1}{b^2 + z^2} \right) \right] \quad \text{mit} \quad R^2 = a^2 + b^2 + z^2 \quad (\text{Eq. 1})$$

Avec

- σ_z = contrainte à la profondeur du sol z
- σ_m = pression de contact moyenne
- q = facteur de concentration en fonction de la consistance du sol
- a = coordonnées correspondantes à l'axe des abscisses de la surface de l'empreinte
- b = coordonnées correspondantes à l'axe des ordonnées de la surface de l'empreinte
- z = profondeur du sol correspondante

Les hypothèses suivantes ont été admises :

- La charge s'exerce à la surface d'un semi-espace infini,
- Le sol est élastique (valable surtout pour le sous-sol),
- Le sol est homogène et isotrope,
- Le sol peut supporter des contraintes de traction,
- Le semi-espace est libre de toute contrainte, c'est-à-dire soumis à aucune force extérieure avant que la charge ne s'exerce.

Le calcul des contraintes reste donc à caractère approximatif. Pour déterminer la contrainte de charge sous le centre de la roue (Eq. 1 – fig. 1), a et b représentent respectivement la moitié de la largeur du pneumatique et la moitié de la longueur de son empreinte au sol. Cette équation a été établie pour TASC à partir de nombreuses mesures sur le terrain sur des sols minéraux agricoles (sols **argileux**, **limoneux**, **silteux** ou **sablonneux**) ayant différentes consistances en surface.

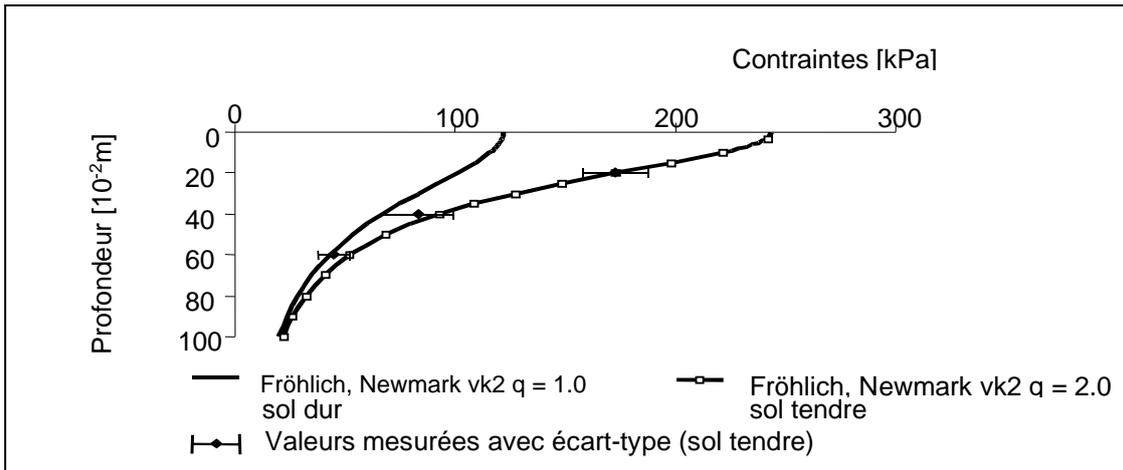


Fig. 1 : modélisation des contraintes pour une moissonneuse-batteuse, pneumatique 800/65R32, charge à la roue avant 7630 kg, pression de gonflage 1,5 bar, sur sol dur ($q = 1.0$) et sur sol tendre ($q = 2.0$) [15].

Plus le sol est tendre, plus la surface sollicitée en surface est réduite, plus la pression de contact est élevée, plus les contraintes pénètrent le sol en profondeur [12].

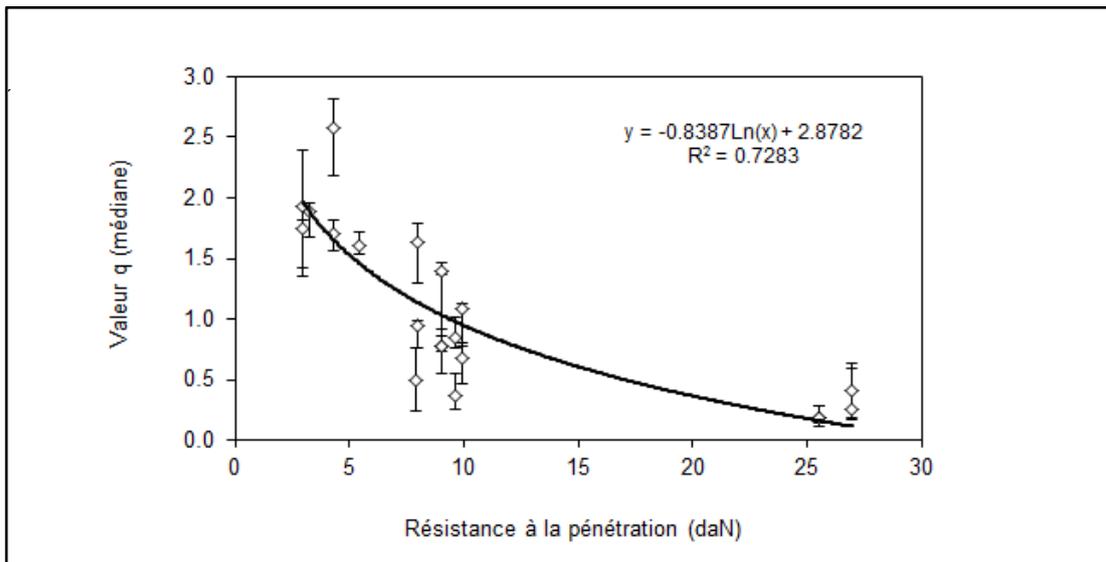


Fig. 2 : facteur de concentration q caractérisant les contraintes en fonction de la consistance du sol en surface (résistance à la pénétration) [12].

Le facteur de concentration q a été calculé à une profondeur de 25 cm à partir des pressions de contact et des contraintes mesurées. La consistance du sol en surface a été mesurée entre 1 et 10 cm de profondeur à l'aide d'un pénétromètre manuel. Le rapport établi entre le facteur de concentration q et la consistance du sol en surface apparaît à la figure 2 [12].

TASC V3.0.xlsm calcule les contraintes dans le sol pour trois catégories de consistance du sol (dure, mi-dure et tendre) (tab. 1) de même que pour des valeurs mesurées (éq. 2. fig. 2).

Tableau 1 : sol en surface et classes de dureté. Résistance à la pénétration RP et valeur q dans le calcul de propagation des contraintes de charge [12]

Classe de dureté	Résistance à la pénétration RP [kgf]	Résistance RP retenue pour le calcul [kgf]	Valeur q pour le calcul
tendre	0 – 4,9	4,0	1,73
mi-dure	$\geq 5 - 7,9$	7,0	1,26
dure	≥ 8	12,0	0,81

Pour faciliter la saisie de la contrainte maximale sous l'axe de la roue ou de la chenille, on a admis que plus le sol était tendre, plus les contraintes se concentraient vers le centre de la roue, raison pour laquelle aucune ligne isobar n'apparaît des deux côtés de la roue ou de la chenille pour des sols mi-durs et tendres, bien que des pressions non négligeables puissent s'y exercer.



Attention : les mesures des contraintes dans le sol n'eurent lieu que sur des sols agricoles avec, tout au plus, une faible couche humique. Les valeurs calculées pour les sols forestiers dotés d'une importante couche d'humus (humus brut, fig. 4b) doivent être interprétées avec précaution.

3.1.2 Les trois éléments-clés de l'évaluation

Dans l'Ordonnance sur les atteintes portées au sol (OSol) du 1.7.1998, l'art. 6, al. 1 déclare :

Quiconque construit une installation ou exploite un sol doit, en tenant compte des caractéristiques physiques du sol et de son état d'humidité, choisir et utiliser des véhicules, des machines et des outils de manière à prévenir les compactations et les autres modifications de la structure des sols qui pourraient menacer la fertilité du sol à long terme.

Voilà ce qu'impose la législation : préserver la structure du sol afin d'en assurer sa fertilité dans le long terme, ceci même en absence de valeurs-seuils légales. Il est impérieux donc de protéger le sol **de manière préventive** (§ 3.4)

Les valeurs indicatives approuvées par la Société Suisse de Pédologie (SSP) sur la **densité apparente effective** (éq. 3) [8] sont considérées comme pouvant être de **premières références** pour déterminer un risque de compactage sévère après passage de machines lourdes sur des sols agricoles ou forestiers (tab. 2).

$$LD_{\text{eff}} = LD_s + 0.009 \times T \quad \text{Eq. 3}$$

avec LD_{eff} : densité apparente effective [Mg/m^3]
 LD_s : densité apparente sèche [Mg/m^3]
 T : teneur (gravimétrique) en argile [%]

Tableau 2 : valeurs indicatives et seuils d'investigation pour la densité apparente effective [8]

	Sol agricole	Sol forestier
Valeurs indicatives	1.70 g/cm³	1.50 g/cm³
Seuils d'investigation	1.85 g/cm ³	1.65 g/cm ³

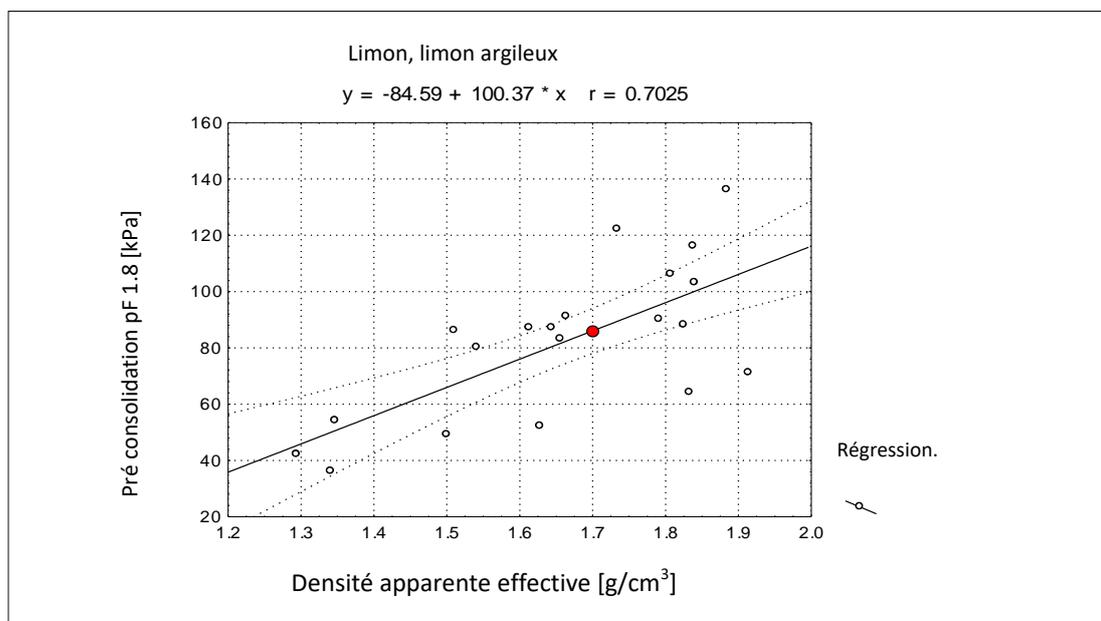


Fig. 3 : calcul de régression donnant la préconsolidation en fonction de la densité apparente effective pour des sols de limon et de limon argileux – sources des données Qasem et al. [16].

Comme la densité apparente varie avec la teneur en argile (plus élevée pour un sol sablonneux que pour un sol argileux), c'est la densité apparente effective, neutralisant cet effet, qui tient lieu de référence. Conformément au principe de prévention, les valeurs indicatives ne doivent pas être dépassées. Soumis à une légère contrainte, le sol à caractère plutôt élastique ne subit aucune déformation. Par contre, s'il est soumis à une charge proche ou supérieure à son seuil de stabilité (seuil appelé aussi préconsolidation), le sol alors plastique se déforme entraînant une augmentation de sa densité apparente comme une diminution de son volume poral.

La **corrélation relativement élevée** ($r = 0.775$) [16] entre la **densité apparente** et la **préconsolidation** (à un pF 1,8, sol à la capacité au champ, humide, drainé, pores grossiers ressuyés) tient lieu de **seconde référence**. La figure 48 illustre la régression liant la préconsolidation à la densité apparente effective pour des limons et limons argileux. Avec une certitude de 90 %, le seuil de stabilité ou préconsolidation se situe dans l'intervalle de confiance. A une densité apparente effective de 1,7 g/cm³ correspond un seuil de stabilité de 85 kPa (0,85 bar). Les contraintes supérieures à 85 kPa doivent être évitées autant que possible pour prévenir tout compactage jugé alors excessif (fig.3).

A partir des données de Lebert [17] (113 mesures, 37 sols de différentes textures), les seuils de stabilité pour sols humides (pF 1,8) et secs (pF 2,5) correspondant à une densité apparente effective de 1,5 g/cm³ (sol forestier) et 1,7 g/cm³ (sol agricole) sont calculés. Cette compilation de données contient notamment des informations sur la densité apparente, sur la teneur en argile, en silt comme sur la préconsolidation pour des valeurs pF de 1,8 et de 2,5. Cette compilation fait figure de **troisième référence**.

Tableau 3 : seuils indicatifs de stabilité pour différents sols, avec risques de compactage sévère a) sol forestier, b) sol agricole - en conditions humides (pF 1.8) comme en conditions sèches (pF 2.5)

a)	Texture du sol	Seuils de stabilité [bar]		Risque de compactage sévère		
		pF 1.8	pF 2.5	pF 1,8	pF 2.5	
	sols argileux Al, A 45 % A	0.55	0.70	très faible faible modéré élevé	< 0.45 0,45–0,55 0,55–0,65 > 0.65	< 0.60 0,60–0,70 0,70–0,80 > 0.80
	sols silteux Ua, Ul, Us, U 15 % A, 80 % U	0.60	0.85	très faible faible modéré élevé	< 0,45 0,45–0,60 0,60–0,75 > 0.75	< 0.70 0,70–0,85 0,85–1,00 > 1.00
	limon argileux, sols limoneux La, L 21 % A	0.50	0.70	très faible faible modéré élevé	< 0,40 0,40–0,50 0,50–0,60 > 0,60	< 0.60 0,60–0,70 0,70–0,80 > 0.80
	limon sableux, sable limoneux Ls, Sl 11 % A	0.65	0.90	très faible faible modéré élevé	< 0,50 0,50–0,65 0,65–0,80 > 0.80	< 0.75 0,75–0,90 0,90–1,05 > 1.05
	sols sableux Su, S 5 % A	0.75	1.10	très faible faible modéré élevé	< 0.55 0,55–0,75 0,75–0,95 > 0.95	< 0.90 0,90–1,10 1,10–1,30 > 1.30

b)	Texture du sol	Seuils de stabilité [bar]		Risque de compactage sévère		
		pF 1.8	pF 2.5	pF 1,8	pF 2.5	
	sol argileux Al, A 45 % A	0.80	0.95	très faible faible modéré élevé	< 0.70 0,70–0,80 0,80–0,90 > 0.90	< 0.85 0,85–0,95 0,95–1,05 > 1.05
	sols silteux Ua, Ul, Us, U 15 % A, 80 % U	1.05	1.30	très faible faible modéré élevé	< 0,75 0,90–1,05 1,05–1,20 > 1.20	< 1.15 1,15–1,30 1,30–1,45 > 1.45
	limon argileux, sols limoneux La, L 21 % A	0.85	1.10	très faible faible modéré élevé	< 0.75 0,75–0,85 0,85–0,95 > 0.95	< 1.00 1,00–1,10 1,10–1,20 > 1.20
	limon sableux, sable limoneux Ls, Sl 11 % A	1.10	1.45	très faible faible modéré élevé	< 0.95 0,95–1,10 1,10–1,25 > 1.25	< 1.30 1,30–1,45 1,45–1,60 > 1.60
	sols sableux Su, S 5 % A	1.30	1.70	très faible faible modéré élevé	< 1.10 1,10–1,30 1,30–1,50 > 1.50	< 1.50 1,50–1,70 1,70–1,90 > 1.90

Le tableau 3 donne les seuils de stabilité calculés, de même que l'évaluation du risque de compactage sévère en conditions humides et sèches pour les sols forestiers (tabl. 3a) et agricoles (tabl. 3b).

On a choisi la plus petite teneur en argile et pour chaque sol silteux, la plus haute teneur en silt afin de calculer le seuil indicatif de stabilité le plus élevé pour chaque classe granulométrique. Par conséquent, quelle que soit la texture du sol, un dépassement du seuil signifie « *Attention danger* ».

Si, au lieu de choisir un type de sol, on introduit des valeurs en teneur d'argile ou de silt, l'évaluation du risque de compactage est alors plus stricte et par conséquent de nature plus prudente. Lorsque la contrainte dans le sol ne dépasse pas le nouveau seuil de stabilité alors inférieur, on peut prétendre avec une certitude plus accrue encore qu'il n'y a pas de risque de compactage sévère.



Remarque : les sols argileux à l'état saturé revêtent un caractère particulier. Si la charge est de courte durée, les contraintes en profondeur ne sont plus absorbées par les agrégats du sol, mais par l'eau enfermée dans les pores. De ce fait, il n'y a plus de risque de compactage. Ceci n'est valable que pour des sols saturés ayant un pourcentage d'argile d'au moins 30 %.

3.1.3 Concept de « risque de compactage sévère »

Le risque de compactage sévère se manifeste lorsque la contrainte est supérieure au seuil de stabilité du sol présentant une densité effective excessive à une profondeur empêchant toute régénération naturelle, tout ameublissement avec un outil de travail. En raison de l'importante variabilité spatiale, topographique des facteurs qui influent la portance d'un sol, on parlera alors de « risque de compactage sévère ». Décréter avec certitude absolue si oui ou non un compactage sévère se produit n'est pas possible. On parle dès lors exclusivement en termes de « risque ».

Si la courbe de propagation des contraintes pénètre le rectangle de pointillés rouges, c'est-à-dire si la contrainte dépasse le seuil de stabilité à la profondeur critique, alors il y a danger. Le risque de compactage sévère n'est plus négligeable, il est bien réel, confirmé par un « **oui** » dans la feuille « Input » de l'application. La fertilité du sol est perturbée à long terme. En revanche, si la courbe de propagation des contraintes ne traverse pas le rectangle de pointillés rouges, les contraintes sévissant à la profondeur critique se situent hors de la zone à risque, la charge est négligeable, il n'y a peu ou pas de risque pour la structure du sol, confirmé par un « non ». Le risque de compactage sévère est faible, voire très faible.

Dans l'application, les contraintes dépassant le seuil de stabilité sont signalées en rouge.



Important : TASC n'indique pas l'ampleur avec laquelle la structure du sol pourrait se dégrader après passage d'un véhicule ou d'un convoi. Cela ne pourrait être envisageable que par des mesures supplémentaires, ponctuelles et laborieuses sur le terrain.

3.2 Caractéristiques des sols

3.2.1 Utilisation du sol

L'application TASC évalue par le calcul la vulnérabilité des sols agricoles et forestiers face au compactage. La configuration du profil près de la surface étant différente pour ces deux types d'exploitation, une procédure adaptée s'impose pour paramétriser le sol.

Exploitation sylvicole. Le sol forestier se caractérise d'abord par une couche organique importante appelée humus (Lüscher et al. 2009). On observe trois grands types d'humus : le mull, l'humus brut et le moder. **Le mull** s'observe sous les feuillus, (fig. 4a). Les résidus de végétation de l'horizon supérieur se décomposent rapidement et sont enfouis dans la terre minérale fine de l'horizon A_h. Le passage

des machines freine l'aération du sol et par conséquent la décomposition de la matière organique. Dans les forêts de conifères ou sous climat froid, on observe la formation d'un **humus brut** (fig. 4b). Il se caractérise par des horizons humifères O organiques fermentés souvent épais. Le mélange avec les horizons minéraux inférieurs reste plutôt limité. Cette forme d'humus est moins menacée par les contraintes mécaniques que le mull. La forme d'humus appelée **moder** est un humus de nature intermédiaire, entre le mull et l'humus brut.

Les horizons des sols minéraux sont divisés en sol superficiel (horizon A) et sous-sol (horizon B). En dessous se trouve la roche-mère (horizon C). Les composants minéraux de la couche superficielle du sol (horizon A_h) sont mélangés à la matière organique. Plus la couche superficielle du sol est riche en matière organique bien incorporée aux éléments minéraux, plus le sol est vulnérable au compactage. L'horizon A_h d'un mull s'avère particulièrement sensible au compactage.



Fig. 4 : les formes d'humus les plus répandues en forêt - a) mull ; b) humus brut - mor [18].

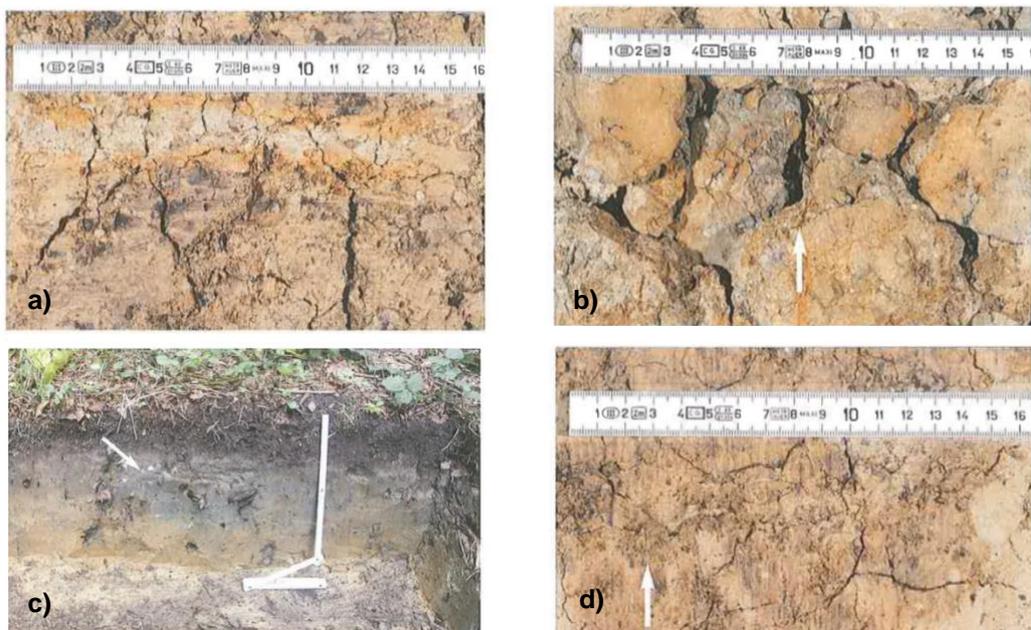


Fig. 5 : hydromorphie du sol, naturelle ou liée au passage des machines : a) marbrure – b) taches de rouille – c) coloration bleu-grise liée au phénomène de réduction – d) concrétions de manganèse [18].

Les traces d'hydromorphie sont également des indicateurs révélateurs des sols en forêt. Les marbrures (coloration rouge terne) qui surviennent dans les zones alternant couleur rouille et plages décolorées (fig. 5a) ainsi que les taches de rouille diffuses (fig. 5b) témoignent souvent d'un phénomène de tassement local avec aération temporairement insuffisante. La coloration bleue-grise liée au phénomène de réduction résulte d'une forte longévité des pores saturés (fig. 5c). Dans les sols hydromorphes, les ornières marquées suffisent à faire apparaître cette coloration grise liée au phénomène de réduction. Tous les sols présentant ces signes dans la frange supérieure du profil, sous les ornières, peuvent être considérés comme frappés par le compactage. Les concrétions de manganèse révélateurs d'une faible hydromorphie, ne sont pas à priori des critères à risque (fig. 5d).

Un indicateur complémentaire : la typologie de l'ornière (fig. 6). Le type d'ornière 1 se trouve en dessous de la limite de plasticité (limites d'Atterberg) soit encore à l'état solide. Le sol s'effrite de lui-même entre les doigts et n'est pratiquement pas comprimé sur le côté. La couche superficielle reste intacte. Le type d'ornière 2 par contre se distingue par son caractère plastique, déformable. Le sol colle aux doigts. Le seuil de plasticité est atteint. De légers renflements apparaissent sur les côtés suite à la compression. La couche superficielle se modifie nettement. Le type d'ornière 3 présente une importante déformation. La limite de liquidité est atteinte voire dépassée. Le sous-sol (horizon B) est menacé. La profondeur de l'ornière atteint 10 cm ou plus. Des renflements importants s'observent suite à la liquéfaction du sol. De nombreuses études observent un lien étroit entre la déformation du sol et la perturbation de certaines fonctions vitales du sol qui s'ensuivent (ornière de type 3).



Important : plus la texture du sol est fine, moins il contient de pierres, plus l'humidité variable est marquée et plus la teneur en humus est élevée, plus grande sera la vulnérabilité du sol au tassement. Pour les sols à risques, il est donc important de prendre des mesures préventives comme une planification détaillée de la desserte, le débardage et le transport sur des sols portants (gelés/secs), des charges à la roue contrôlées avec des pneumatiques aussi larges que possible et faiblement gonflés [18].

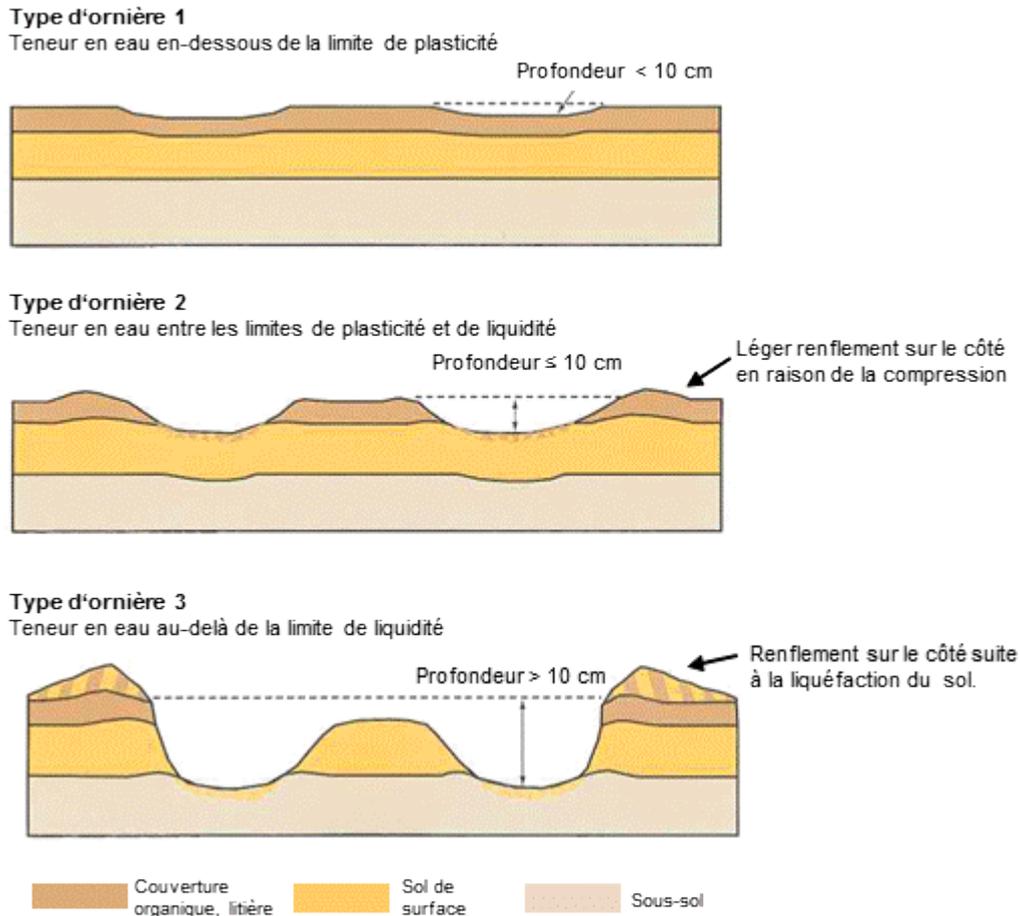


Fig. 6 : typologie des ornières en sol forestier [18].

En paramétrisant le sol et les machines, un examen de la vulnérabilité du sol forestier avec TASCv4.0 est possible.

Exploitation agricole. Contrairement au sol forestier, le sol agricole n'a pas de strate organique marquée en surface. Le sol étant ameubli périodiquement, la matière organique (couche de litière) se décompose, se transforme en humus tout en se minéralisant plus rapidement (fig. 7a-b). Comme la teneur en humus dans l'horizon supérieur A des terres arables comme des prairies est plus faible que celle des sols forestiers, les sols agricoles sont aussi moins sensibles au tassement [19]. Par ailleurs sur terre arable, un ameublissement du sol avec un outil reste toujours envisageable.

Il existe un certain parallélisme entre le sol forestier et la prairie permanente, dans la mesure où la structure de ces deux types de sol n'est pas reprise par un outil ameublissant. Le feutre racinaire d'une prairie permanente bien établie stimule la texture grumeleuse du sol (0-15 cm) et offre une sérieuse résistance aux fortes contraintes de charge (fig. 7c). La prairie temporaire peut être considérée comme un stade intermédiaire (fig. 7b) entre la prairie permanente et les sols à grandes cultures. Son action est régénérante pour la structure.

Les sols agricoles sont également sujets à l'hydromorphie. Un manque d'air temporaire ou prolongé est alors à déplorer (fig. 5). Dans les sols particulièrement sensibles, en présence de coloration bleu-grise liée au phénomène de réduction, le choix de l'assolement, des machines et du calendrier des travaux joue un rôle décisif.

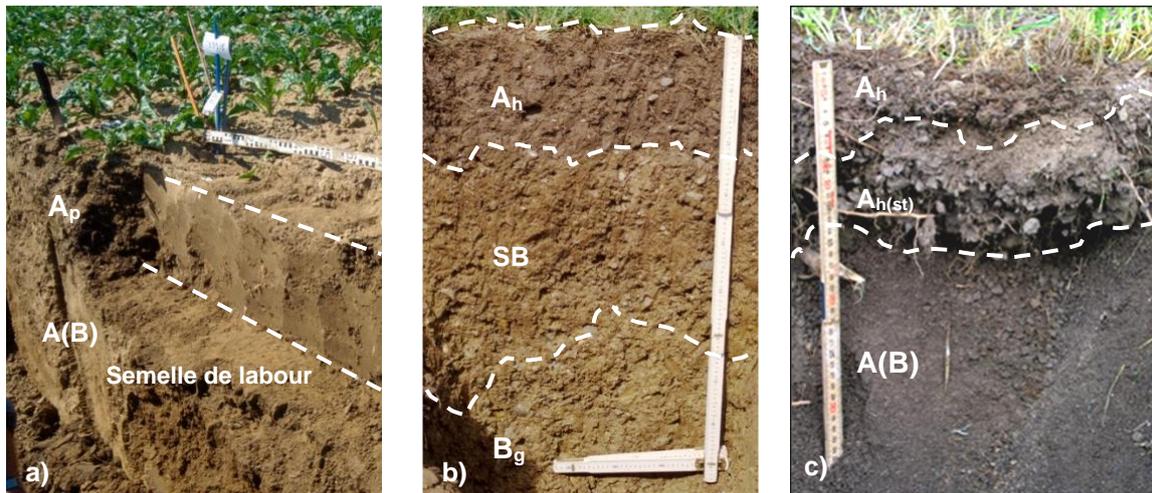


Fig. 7 : profils de sols agricoles : a) sol brun, profond, travail du sol intensif, semelle de labour marquée ; b) sol brun lessivé à pseudogley, régime hydrique variable, travail du sol entravé ; c) sol brun calcaire, prairie permanente, horizon racinaire très marqué, écran protecteur pour l'horizon minéral sous-jacent A(B) à 15 cm de profondeur.

L'exploitation du sol agricole restant généralement intensive avec de surcroît des surfaces entièrement foulées par les machines après quelques cycles culturaux seulement, l'évaluation qualitative de la structure du sol joue dès lors un rôle prépondérant à des fins de protection préventive. Comme pour l'évaluation du profil, un examen permanent de la structure du sol, de l'enracinement, de l'activité des vers de terre, de la couleur et de l'odeur est recommandé. La méthode d'appréciation développée par le vTI Braunschweig sur la réponse du sol avec photos couleurs à l'appui est simple, adaptée aux exigences du praticien [20]. Après ouverture d'une petite fosse (100 x 50 x 50 cm) à l'aide d'une bêche, les horizons « surface, couche arable, base de la couche arable et sous-sol proche de la couche arable » apparaissent. Six paramètres (1) structure de la surface, (2) enracinement du sol (3) macropores/biopores, (4) structure et consolidation, (5) résidus organiques et (6) couleur et odeur sont évalués à l'aide d'une échelle à cinq degrés (++/+0/-/-). La détermination qualitative et quantitative des unités structurales du sol naturels (grumeaux, agrégats sub-polyédriques ou polyédriques subanguleux) et anthropogènes (mottes rondes, fragments, mottes anguleuses) selon la méthode Agroscope [21] consiste en une étape affinée de l'évaluation structurale du sol et de son adéquation dans un processus de production et de fertilité à long terme. Les « bonnes pratiques agricoles » consistent à elles-seules déjà une excellente approche pour protéger el sol de manière prophylactique [22, 23].

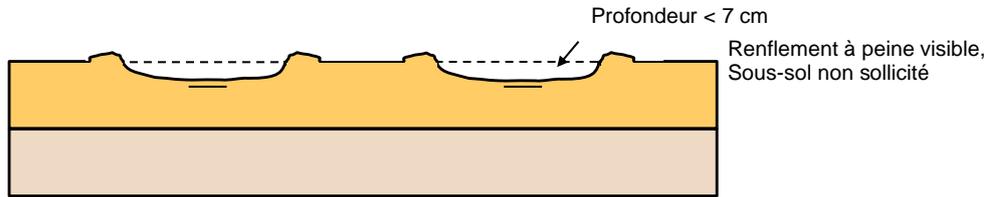
Pour les sols agricoles, l'évaluation des ornières est également un indicateur précieux supplémentaire dans l'évaluation des risques de compactage (fig. 8). A partir de mesures avec profilomètre et analyses du sous-sol (densité apparente, volume des pores grossiers), on distingue deux types d'ornière. Pour le type 1, la profondeur de l'ornière ne dépasse pas 7 cm sur sol rassis, portant. Le sous-sol peut encore être humide (capacité au champ). Les éventuelles déformations ne se produisent que dans la couche superficielle du sol (horizon Ap) dans les premiers 20 à 25 cm de profondeur. Pour le type 2, sur sol rassis, la profondeur de l'ornière dépasse 7 cm, d'importants bourrelets apparaissent de part et d'autre de l'ornière. Des déformations sous la semelle de labour ne sont plus à exclure. Le risque de compactage avec de lourdes machines ne peut diminuer nettement que lorsque le sous-sol est portant, généralement sec [24].



Important : pour préserver la fertilité des sols agricoles à long terme, il est indispensable de contrôler en permanence la structure du sol, l'enracinement, l'activité des vers de terre, la couleur, l'odeur et la profondeur des ornières [20, 21, 22, 23].

Type d'ornière 1

Teneur en eau du sol correspondant à la capacité au champ
Sol rassis en surface en période de récolte, mécanisation légère



Type d'ornière 2

Teneur en eau du sol (surface + sous-sol) à la capacité au champ.
Sol rassis en surface en période de récolte, mécanisation lourde

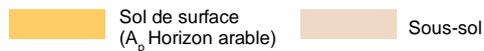
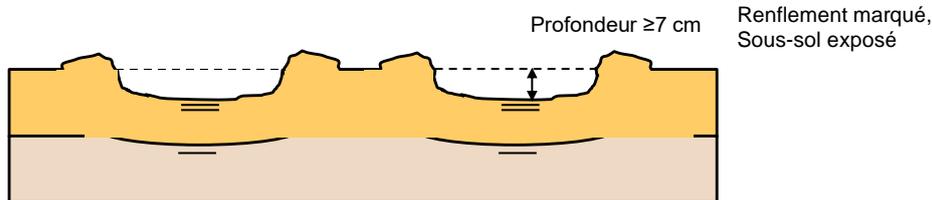


Fig. 8 : typologie des ornières en sol agricole arable [24]

3.2.2 Types de sol

Le seuil de stabilité d'un sol varie avec sa « granulométrie » ou « texture » (§ 3.2.2) et son humidité (§ 3.2.3). Un sol sableux à texture grossière est plus portant qu'un sol argileux à texture fine. Comme la texture n'est que rarement homogène dans le profil du sol, le forestier ou l'agriculteur l'identifiera à la profondeur critique à partir de laquelle le sol doit être impérativement protégé (§ 3.2.5). En grandes cultures, on identifiera la texture au niveau de la semelle de labour (horizon A_p), au-dessous de laquelle un ameublissement n'est généralement plus envisageable.

Lorsque la granulométrie (ou texture) du sol n'est pas connue, elle peut être identifiée à l'aide d'un test tactile simple (tab.4).

Tableau 4 : analyse de la texture du sol par test tactile à la profondeur critique

Texture du sol [25]	Test tactile sur sol humide : caractéristiques [24, 25]
sols argileux > 40 % argile, < 50 % silt	colle entre le pouce et l'index, surface brillante, grains pratiquement imperceptibles
sols silteux > 50 % silt	savonneux, adhérent, mais non collant
limon argileux, sols limoneux 20–40 % argile, < 50 % silt	adhère et colle entre le pouce et l'index, surface mate
limon sableux et sable limoneux 10–20 % argile, < 50 % silt	quelques grains de sable visibles et perceptibles, faiblement cohésif, forme un boudin de l'épaisseur d'un crayon, adhère peu
sols sableux 0–10 % argile, < 50 % silt	pas ou peu cohésif, à peine malléable, fendillé et friable, grains de sables perceptibles, n'adhère ni ne colle



Restrictions : TASC convient essentiellement pour les sols **minéraux**, argileux, silteux ou limoneux voire riches en sable mais pas pour les sols organiques (gley à moor, tourbières avec des teneurs en matière organique de plus de 15%). Les sols organiques s'avèrent être des sols plutôt tendres, peu portants. Fermeté et portance s'atténuent avec l'augmentation de la teneur en humus. Les ornières se referment rapidement après le passage des machines. La structure de la couche organique en ce sens n'est que peu vulnérable. Ce n'est pas le cas des couches minérales. L'épaisseur des horizons organiques est très variable allant de quelques centimètres à plus de 45 centimètres. La propagation des contraintes dépend donc de l'épaisseur et de la distribution des couches minérales et organiques superposées. La dureté du sol dans les 10 premiers centimètres ne suffit plus à elle-seule pour estimer les contraintes de charge dans le sol (§ 3.1.2). Pour évaluer le risque de compactage sévère, l'épaisseur très variable des couches organiques est déterminante. L'insuffisance de nos mesures ne permet aucune simulation fiable pour ce type de sol.

Pour les tourbières, il existe déjà une clé de détermination permettant d'évaluer le risque de compactage. Elle est basée sur les mesures de cisaillement, le type de biotope, la densité de végétation, le type de machines et les pneumatiques [26].



Restrictions : les essais initiaux ont été effectués sur des sols à faible **pierrosité** (< 3 %). On admet par hypothèse que la portance du sol augmente avec la pierrosité, ce qui rend le sol moins sensible au compactage. TASC fait abstraction de ce paramètre.

3.2.3 Humidité du sol

L'humidité du sol après la texture est le second paramètre influençant le seuil de stabilité à la profondeur critique.

Tableau 5 : test tactile pour déterminer l'humidité du sous-sol à la profondeur maximale d'ameublissement avec temps d'attente recommandé

Etat du sol	Caractéristiques [24, 27]	Temps d'attente (sans pluie) selon la texture du sol*
sec (pF \geq 2.5)	agrégats très difficiles à casser, la paume de la main reste sèche, aucune sensation de froid sur le dos de la main.	<ul style="list-style-type: none"> aucun temps d'attente
humide (pF 1.8)	agrégats faciles à effriter en les pressant entre les doigts, la terre n'adhère pas à la peau, sensation de froid sur le dos de la main.	<ul style="list-style-type: none"> sols sableux: env. ½ jour silts, sols limoneux: env: 3 jours sols argileux: env. 5 jours
saturé (pF < 1.8)	agrégats pétrissables, voire pâteux, apparition d'une lentille d'eau en compressant le sol entre le pouce et l'index, la terre adhère à la peau humide.	<ul style="list-style-type: none"> sols sableux: 1 jour silts, sols limoneux: au moins 3 jours sols argileux: au moins 5 jours

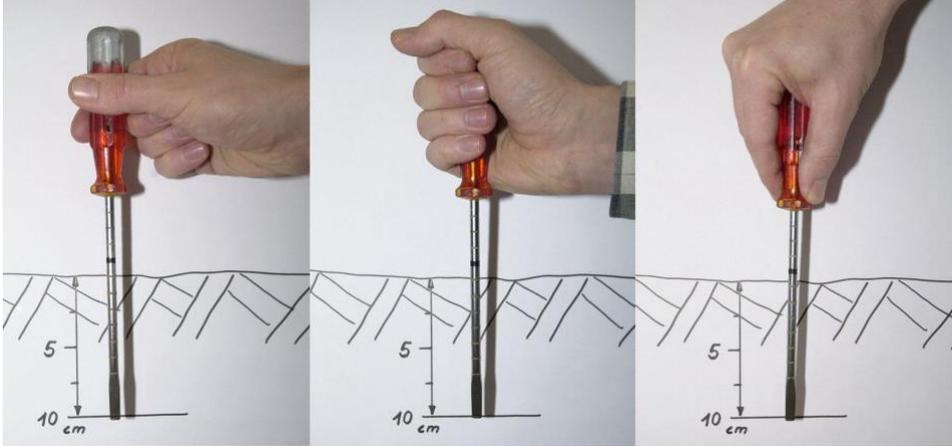
* Par forte évapotranspiration, le temps d'attente peut être écourté de 1 à 2 jours.

Soumis à une contrainte donnée, un sol va réagir différemment suivant sa teneur en eau. Un sol humide drainé est moins porteur qu'un sol sec. Comme la distribution de l'eau n'est pas nécessairement homogène dans le profil du sol, le forestier ou l'agriculteur doit identifier l'humidité à la profondeur critique pour protéger le sol minéral plus en profondeur (§ 3.2.5). Le procédé le plus facile et direct pour évaluer l'humidité du sol est d'effectuer le test tactile (tab. 5). Une autre solution laborieuse comme coûteuse consiste à employer des tensiomètres. Comme les seuils de stabilité n'ont été mesurés que pour des valeurs pF de 1,8 (capacité au champ, sol ressuyé) et 2,5 (sol sec, mésopores largement ressuyés) en laboratoire [16, 17, 28], le risque de compactage ne peut être évalué qu'à ces deux degrés d'humidité. Les nombreux essais au champ en conditions proches de la saturation n'ont pas montré de relation étroite entre la teneur en eau et l'importance des atteintes (augmentation de la densité apparente, diminution du volume des pores grossiers) [12, 15]. Des déformations ont été cependant observées isolément dans des sols secs comme humides.

3.2.4 Consistance du sol en surface

La consistance du sol en surface, appelée aussi « résistance du sol à la pénétration » est mesurée à avec un pénétromètre. Ce paramètre renferme à lui seul une série de caractéristiques comme l'humidité du sol, la texture du sol et sa structure, la couverture végétale, l'enracinement. Ce paramètre ne décrit pas a priori la sensibilité du sol au compactage, mais la résistance du sol à la pénétration ou sa portance en surface : un facteur déterminant pour calculer la propagation des contraintes sous la roue. Plus le sol est tendre en surface, plus les contraintes de charge se propagent en profondeur. Plus le sol est dur en surface, plus les contraintes de charge vont se propager latéralement, sur les côtés. La **consistance du sol en surface** est caractérisée par les trois épithètes "tendre", "mi-dure" et "dure" correspondant à une force de pénétration respective de 0 – 4,9, \geq 5 – 7,9 et de \geq 8 kgf « kilogramme force ».

Dans l'application TASC, ces trois classes correspondent à des résistances de pénétration respectives de 4, 7 et 12 kgf (tab. 1). A l'aide d'un tournevis [24] (largeur de la tête 6 mm, 1 mm d'épaisseur), ces classes sont aisément identifiables (fig. 9). A l'aide d'un pénétromètre mécanique ou digital, muni d'une pointe identique, les valeurs mesurées (≤ 30 kgf) peuvent également être introduites dans l'application.



Consistance	Descriptif
tendre (a)	résistance à la pénétration de 0 à 4.9 kgf le tournevis tenu entre le pouce et l'index pénètre sans effort jusqu'à une profondeur de 10 cm
mi-dure (b)	résistance à la pénétration de 5 à 7.9 kgf le tournevis tenu à pleine main pénètre sans effort jusqu'à une profondeur de 10 cm
dure (c)	résistance à la pénétration au-delà de 8 kgf sous la pression du poing, le tournevis pénètre jusqu'à une profondeur de 10 cm
matériel	un tournevis no. 4 (tête intacte, 6 mm de large, 1 mm d'épaisseur) ou un pénétromètre manuel <i>type 800/20, ou type 800/50</i> de la maison Pesola à Baar/ZG Suisse
préalable	étalonner son propre geste sur une balance posée à même le sol avec le tournevis

Fig. 9 : le test du tournevis.



Important : en **forêt**, le test au tournevis convient aux voies de débardage. Sur les sols intacts recouverts d'une épaisse couche organique, il doit être effectué directement sur les horizons minéraux-organiques A_h . En **terrain agricole**, le test du tournevis se pratique sur les surfaces vierges, non foulées ou parfois dans les voies de passage. Avec les outils frontaux (organes d'arrachage des décolleteuses-récolteuses chargeuses automotrices, rouleaux frontaux) il faut veiller à ce que la consistance du sol soit détectée à proximité directe des roues avant ou arrière, suivant la marche du véhicule.

3.2.5 Profondeur critique

La profondeur critique z_k désigne la profondeur à partir de laquelle le sol doit être impérativement protégé de compactages excessifs, car ne pouvant être régénéré de lui-même ou repris par un outil ameublissant.

Application sylvicole. En forêt, le sol n'étant pas repris par un outil ameublissant, se trouve naturellement « rassis ». Le sol minéral est protégé par une couche organique plus ou moins importante. Plus cette couche est épaisse, plus le sol est protégé. Sans un horizon humique profond (mull) (fig. 4a) l'horizon minéral A_h n'est pratiquement pas protégé. La couche de litière reste fine alors que la teneur en carbone organique dans le sol de surface est élevée, accroissant la sensibilité au compactage. Il est de ce fait important de limiter l'usage des machines en conditions sèches ou de gel sur les voies de passage répertoriées. Sur sols sensibles, il est indiqué de renforcer les voies de débardage à l'aide de résidus organiques supplémentaires (branchages, écorces, broussailles) [29, 30]. Un réglage adéquat des machines (charge à la roue, pression de gonflage, répartition des charges) contribue également à protéger le sol.

En présence d'un important « matelas » organique, constitué d'humus brut peu décomposé (horizon O_f , fig 4b), l'horizon minéral A_h moins riche en matière organique est mieux protégé. Cette couche d'humus à peine structurée peut servir de zone tampon. Plus elle est importante, plus son effet protecteur sera élevé. La profondeur critique apparaît alors sous l'horizon O_f , à la hauteur des horizons O_f/A_h . Dans le Moyen-Pays, la profondeur critique reste généralement faible, Dans les Préalpes ou les Alpes, ce manteau peut avoir plus de 20 cm d'épaisseur. La profondeur dite critique se laisse identifier en forêt sur les voies de débardage ou sur les surfaces vierges, non foulées.

Application agricole. Sur les terres arables, le sol agricole peut être labouré ou ameublit. Le sol devant resté périodiquement sec, cette profondeur critique ne pourra être déterminée qu'en observant le régime hydrique du sol. Cette profondeur est appelée profondeur critique à partir de laquelle, le sol doit être impérativement protégé, continuant à jouer son rôle dans la formation du rendement de la plupart des cultures. Les contraintes démesurées sont à proscrire. Si l'agriculteur renonce catégoriquement à tout labour ou tout travail du sol, il fixera la profondeur critique dans les tous premiers centimètres du sol déjà.

Sur les prairies permanentes, le sol est jugé moins vulnérable. Le feutre épais des racines assure une résistance et une stabilité structurales non négligeables dans les 10 à 20 premiers centimètres. Au-delà, la structure du sol même si elle joue un rôle moindre dans la formation des rendements, se doit d'être protégée en raison de sa capacité de rétention d'eau.



Important : il est nécessaire d'évaluer la profondeur critique du sol **cas par cas**, compte tenu de leurs propriétés morphologiques et leurs modes respectifs d'exploitation.

3.3 Caractéristiques des machines

Les charges ou contraintes infligées au sol par les machines dépendent des dimensions des pneumatiques ou des chenilles, des charges respectives et de la pression de gonflage. Tous ces facteurs influent la surface de l’empreinte, la pression de contact et conditionnent ainsi l’évolution des contraintes dans le sol.

3.3.1 Type/structure des pneumatiques et des chenilles

Les mesures effectuées sur le terrain pour relever la surface de l’empreinte puis simuler la propagation des contraintes dans le sol ont lieu exclusivement avec des pneumatiques agricoles avec profils de traction (fig. 10a-b) ou de transport (fig. 10c-e). Les pneumatiques avec le profil « traction » (fig. 10b) peuvent également servir pour le transport.

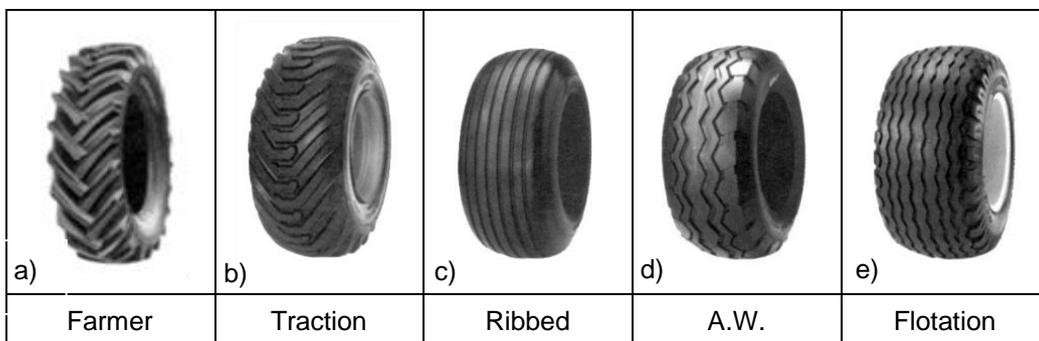


Fig. 10 : a-b) profils, pneumatiques de traction ; c-e) profils, pneumatiques de transport.

Le terme « Type de pneumatique » caractérise un pneumatique suivant le rapport entre sa hauteur et sa largeur (tab. 6). On distingue trois types : « no » pour pneumatiques à section normale, « ni » pour pneumatiques basse section et « tr » pour pneumatiques Terra. Les pneumatiques basse section et les pneumatiques Terra sont des pneumatiques dits larges, car leur largeur représente au moins un tiers du diamètre extérieur [31]. Le type de pneumatiques influe la surface d’empreinte des pneumatiques de transport [32]. Lorsqu’on sélectionne un pneumatique dans le répertoire des pneumatiques, l’abréviation correspondante « no », « ni » ou « tr » est directement reprise dans le tableau de saisie.

Le terme « Structure du pneumatique » caractérise les propriétés constitutives d’un pneumatique. On distingue deux structures : « d » pour structure diagonale (nappes intercroisées et vulcanisées avec un angle de 40 à 50 degrés par rapport au sens de progression de la machine) et « r » pour structure radiale (nappes vulcanisées formant un angle de 90 degrés par rapport au même sens de progression avec ceinture supplémentaire renforçant la bande de roulement). Les pneumatiques à structure radiale se déforment davantage en raison de leur bande de roulement rigide et de leurs flancs particulièrement souples. Ces deux parties sont relativement indépendantes l’une de l’autre. Les pneumatiques moteurs à structure radiale ménagent davantage les sols, patinent moins, présentent une force de traction et une résistance à l’usure supérieures. La distinction est importante lorsqu’il s’agit de calculer la surface d’empreinte [32].



Important : les pneumatiques qui ne figurent pas dans la banque de données peuvent être introduits manuellement dans le tableau de saisie « Input ». Attention, inscrire de quel genre de pneumatique il s’agit dans la cellule correspondante de la ligne du haut (Ex. AGRICULTURE / Pneumatiques de traction).

Tableau 6 : types de pneumatiques avec caractéristiques

Types	Abré- viation	Rapport hauteur/ largeur	Propriétés
pneumatiques à section normale	no	$\geq 0,8$	plutôt rigide, pression de gonflage jusqu'à 3,0 bar, supérieure à 4,0 bar pour les pneumatiques étroits (soins culturaux)
pneumatiques basse section	ni	$0,6 < x < 0,8$	plus large que le pneumatique à section normale, à structure radiale, à flancs souples; supporte les mêmes charges avec des pressions de gonflage inférieures; pression recommandée ne dépassant généralement pas 2,0 bar
pneumatiques Terra	tr	$\leq 0,6$	pneumatique large, en général à structure diagonale; supporte des charges élevées avec des pressions de gonflage plutôt réduites; pressions recommandées entre 0,6 et 2,0 bar pour les pneumatiques de moins de 10 PLY ; n'est généralement pas conçu pour de lourdes charges

L'abréviation "ra" est utilisée pour les chenilles avec crampons engagées sur des sols agricoles. La surface de l'empreinte correspond à la largeur des chenilles multipliée par leur longueur. Les chenilles sans crampon (pour travaux sur chantier) ne peuvent être prises en compte que de manière limitée. Si la chenille est considérée comme suffisamment rigide, il faut sélectionner "dure" pour la consistance du sol en surface, et ce, même sur des sols mous et mi-durs en surface (répartition uniforme de la pression sur la largeur).



Attention : comme la répartition longitudinale de la pression n'est généralement pas homogène sous les chenilles, les résultats doivent être interprétés avec prudence, notamment dans la couche superficielle du sol.



Attention : bien que les données techniques des pneumatiques forestiers aient également été répertoriées dans la banque de donnée, aucune mesure n'a été réalisée in-situ, aucun algorithme spécifique n'a été développé pour ce genre de pneumatiques. Etant donné leur bande de roulement robuste, leur zone d'épaulement (avec ceinture d'acier), leurs flancs renforcés (également avec protection en nylon), on peut supposer que la flexibilité d'un pneumatique forestier à dimension, structure (diagonale ou radiale) et charge égales est plus faible que celle d'un pneumatique agricole. Les pressions calculées auront tendance à être sous-estimées.

3.3.2 Largeur des pneumatiques et des chenilles, diamètres des pneumatiques, longueur de la bande de roulement

La largeur et le diamètre des pneumatiques ainsi que la largeur et la longueur des chenilles sont des données indispensables pour calculer la surface d'empreinte [32, 33, 34]. Dans le répertoire des pneumatiques, la surface d'empreinte est calculée exclusivement à partir de la largeur du pneumatique et de son diamètre extérieur. Cette valeur permet dans un premier temps d'évaluer la contrainte exercée sur le sol uniquement à partir de la taille du pneumatique, sans tenir compte ni de la charge à la roue, ni de la pression de gonflage.

Sélectionnez le type de pneumatique désiré dans le répertoire des pneumatiques avec un double-clic ; les dimensions correspondantes sont alors automatiquement reprises dans le tableau de saisie « Input ».

Pour les pneumatiques qui ne figureraient pas dans le répertoire, indiquez manuellement les dimensions en cm (1 pouce = 2.54 cm). Chaque pneumatique comporte une désignation permettant de déduire le diamètre. La lecture de ce code est expliquée à la feuille "Comments", points 1, 6, 7. On peut également accéder à cette page explicative en cliquant sur le bouton „Commentaires“ en haut à droite dans les feuilles attribuées aux données techniques des pneumatiques. Pour les pneumatiques jumelés ou axes tandem, les pneumatiques peuvent être regroupés ou pris séparément. Les tableaux 7 et 8 fournissent des exemples.

Tableau 7 : exemple de calcul avec roues jumelées

Paramètres	Roue non jumelée mode „no“		Roues jumelées mode „ra“
consistance du sol	dur	dur	dur
charge à la roue [kg]	1110	185	1295
pression de gonflage [bar]	0.6	0.6	-
désignation du pneumatique	420/85R34	11.2R32	420/85R34 / 11.2R42
largeur du pneumatique [cm]	44.2	29.8	74.0 (somme)
diamètre du pneumatique [cm]	158.1	157.4	-
surface de l'empreinte [cm ²]	1553	860	2413 (somme)
longueur équivalente de l'empreinte [cm]	35.1	28.9	32.6 (2413/74)
pression de contact [bar]	0.70	0.20	0.53
pression dans le sol à 30 cm [bar]	0.25	0.05	0.21

Tableau 8 : exemple de calcul avec axe tandem

Paramètres	Roue non jumelée mode „ni“		Axe tandem mode „ra“
consistance du sol	dur	dur	dur
charge à la roue [kg]	1460	1670	3130
pression de gonflage [bar]	2.5	3.0	-
désignation du pneumatique	13.0/75-16	13.0/75-16	13.0/75-16 / 13.0/75-16
largeur du pneumatique [cm]	33.6	33.6	33.6
diamètre du pneumatique [cm]	90	90	-
surface de l'empreinte [cm ²]	915	947	1862 (somme)
longueur équivalente de l'empreinte [cm]	27.2	28.2	55.4 (1862/33.6)
pression de contact [bar]	1.57	1.73	1.65
pression dans le sol à 30 cm [bar]	0.41	0.46	0.63

Pour les roues jumelées, si l'on ne connaît que la charge totale, on peut également considérer les deux roues comme n'en étant qu'une avec une répartition homogène de la charge. Les largeurs sont additionnées. Les diamètres et les pressions de gonflage restent inchangés. La charge sur chacune des roues reste proportionnelle à leur largeur respective.

Le calcul individuel des roues permet de déduire les longueurs équivalentes des empreintes. En reportant ces longueurs équivalentes dans le mode „ra“ (chenille), le calcul des contraintes fait alors abstraction des espaces entre-roues.



Important : lorsque la charge est répartie de manière homogène sur les deux roues, il est préférable d'effectuer le calcul pour chaque roue séparément de manière à vérifier la vulnérabilité du sol en surface. En revanche, pour évaluer les risques de compactage dans le sous-sol, il est préférable de regrouper les roues en une seule.

3.3.3 Charge à la roue et à la chenille

La charge à la roue [32, 33], à la chenille est importante pour calculer la surface de l'empreinte sur le terrain, mais aussi pour calculer la pression de contact moyenne et les contraintes dans le sol [12]. La charge autorisée pour un pneumatique en fonction de la pression de gonflage, de la vitesse et du travail effectué doit être calculée à l'aide des normes ETRTO [11]. Les cas spéciaux doivent être discutés avec les manufacturiers du pneumatique. Dans la pratique, les charges à la roue ou à la chenille peuvent cependant varier par rapport aux valeurs statiques (mesurées à l'arrêt sur des balances routières ou des ponts-basculés, sans outils ni charges supplémentaires). Lors d'un **travail de traction avec déplacement du centre de gravité**, lors d'une subite **accélération négative ou positive, dans les virages**, sur **terrain en pente** (latéralement par rapport aux courbes de niveau et dans l'axe longitudinal en montée et en descente), la répartition des charges varie. Pour obtenir des résultats réalistes, quelques adaptations sont donc nécessaires. Cela concerne les outils attelés et semi-portés d'un poids élevé (annexe 4), les charges élevées sur le timon d'attelage (la charge à la roue augmente à l'arrière), les travaux de relevage avec le frontal chargé (la charge à la roue avant augmente). Les différents niveaux de remplissage des réservoirs et des trémies sur les machines de récolte entraînent également des variations importantes de charge. Sous l'effort de traction au champ, le report de charge de l'essieu avant vers l'essieu arrière du tracteur se laisse calculer (Module 2 - § 4.1.5). TASC tient compte des charges dynamiques lorsque le tracteur travaille le sol.

Avec les chenilles, les pressions de contact partielles peuvent différer de la moyenne calculée en raison de tensions insuffisantes des chenilles, de suspension et intervalle importants entre les galets d'appui, du point d'accouplement des outils traînés, de l'état du sol [35]. Des erreurs lors de l'accouplement des outils (solicitation trop importante sur la roue arrière de renvoi) peuvent avoir de sérieuses conséquences pour le sol (charges ponctuelles excessives). Comme pour les pneumatiques, la pression de contact moyenne est retenue pour valeur initiale, calculée à partir de la surface de l'empreinte et de la charge à la chenille. TASC ne peut fournir d'informations réalistes que si la charge est répartie de manière la plus homogène possible sur toute la longueur de la chenille comme le montrent les résultats de Marsili pour des sols cohésifs [34]. Des résultats faibles sont possibles sur sols ameublés et plats avec une profondeur d'enfoncement constante des chenilles de l'avant vers l'arrière pendant le travail. Les chenilles doivent prendre appui sur une surface plane, sans ondulation du sol.

3.3.4 Pression de gonflage

Comme la charge, la pression de gonflage influe étroitement la surface de l'empreinte [32, 33] et par là-même, la pression de contact et les contraintes dans le sol [12]. Au champ, une pression réduite est conseillée pour préserver le sol ; sur route à vitesse plus élevée, une pression de gonflage supérieure

est alors recommandée. L'ordre de grandeur varie entre **0,5 et 2,5 bar** pour les pneumatiques moteurs, jusqu'à **4,4 bar** pour les pneumatiques étroits et jusqu'à **5,0 bar** pour les pneumatiques de transport. Lorsque les fabricants de pneumatiques recommandent des valeurs inférieures ou supérieures (ce qui n'est que rarement le cas), les résultats doivent alors être interprétés avec précaution. Conformément aux indications des fabricants, la pression de gonflage doit être adaptée à la charge à la roue et à la vitesse du véhicule. Avec roues jumelées, la roue extérieure est généralement moins gonflée (**0.4 bar**) pour décharger l'essieu.

 **Important** : « **Sylviculture / Pneumatiques moteurs** » – avec une pression de gonflage jusqu'à 2,2 bar, la consistance du sol en surface peut être prise en compte dans le calcul de la surface de l'empreinte et de la pression de contact. Avec une pression de gonflage supérieure à 2,2 bar allant jusqu'à 4,0 bar, choisir la variante "semi-dure" ou "tendre" pour la consistance du sol en surface. Avec la variante "dure", les pressions de contact sont plutôt sous-estimées.

« **Agriculture / Pneumatiques moteurs** » - avec une pression de gonflage comprise entre 0,5 und 2,5 bar, la consistance du sol en surface peut être prise en compte dans le calcul de la surface de l'empreinte et de la pression de contact. Au-dessus de 2,5 bar, choisir la variante "dure". Avec les variantes "semi-dure" et "tendre", la pression de contact est plutôt surestimée.

 **Conseil** : équipé d'un système de télégonflage, le conducteur peut, à l'arrêt ou pendant le trajet, choisir et régler rapidement la pression de gonflage, ceci au gré de la charge et de la vitesse. Cette mesure ménage le sol, augmente la force de traction, réduit la charge de travail, diminue l'usure des pneumatiques et la consommation de carburant et rend la conduite plus sûre. Le télégonflage est recommandé pour les tracteurs de plus de 100 kW avec les citernes à lisier de 8 m³ et plus [36]. Krude et PTG sont des fabricants établis [37].

3.3.5 Surface de l'empreinte, pression de contact moyenne

La surface de l'empreinte et la pression de contact sont interdépendantes. Elles permettent d'évaluer la vulnérabilité du sol directement en surface, puis de calculer la propagation de la contrainte de charge précédant l'évaluation du risque de compactage. Les algorithmes (régressions) intégrés ici pour le calcul de la surface de l'empreinte proviennent de mesures effectuées sur terrain agricole avec de nombreux pneumatiques agricoles moteurs [33, 38] et de transport [32, 38].

La surface de l'empreinte du pneumatique a été relevée à l'arrêt. De la poudre de chaux a été épandue autour du pneu (fig. 11a). Après déplacement du véhicule et libération de la surface d'appui, la zone a été photographiée avec une caméra digitale (fig. 11b) puis quantifiée par analyse d'image (fig. 11c).

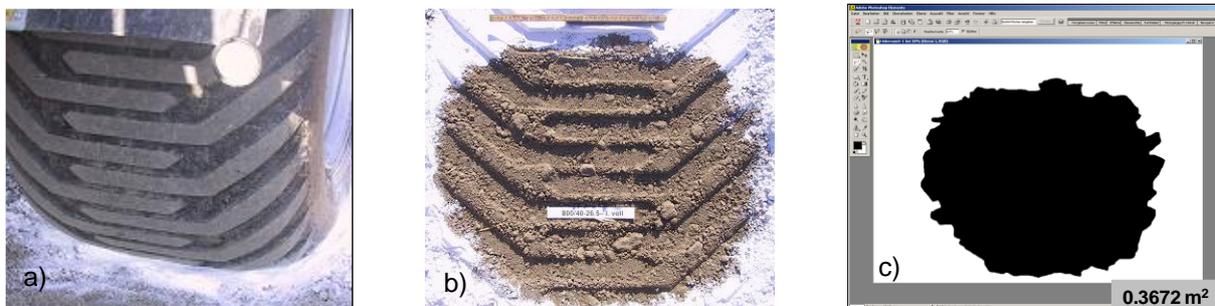


Fig. 11 : détermination de la surface de l'empreinte - a) marquage avec de la chaux ; b) saisie digitalisée ; c) analyse d'image avec Adobe/Photoshop et Excel.

La charge à la roue est mesurée avec des balances routières (max. 10 t. +/- 13 kg) (fig. 12) et la pression de gonflage à l'aide d'un manomètre portable 4.5 bar +/- 0.02 bar, de la firme MotoMeter.



Fig. 12 : balance routière, société Haenni, type WL 103, surface sensible 66 x 38 cm.

Avec la largeur et le diamètre du pneumatique, ces deux paramètres, charge et pression de gonflage, font partie des quatre variables clés pour déterminer la surface de l'empreinte.

Compte tenu des mesures effectuées sur couche arable raffermissée ou prairie permanente, **les pneumatiques moteurs** généralement avec profil Farmer (fig. 10a) et structure radiale ont été répartis en deux catégories : pneumatiques de petite taille (diamètre [cm] x largeur des pneus [cm] < 6000) et pneumatiques de grande taille (diamètre [cm] x largeur des pneus [cm] ≥ 6000). Une distinction au niveau de la dureté du sol s'est révélée judicieuse. Deux catégories sont proposées : les sols tendres à mi-durs (résistance à la pénétration < 8 kg) et les sols durs (résistance à la pénétration ≥ 8 kg). En distinguant pneumatiques et sols respectivement selon leur taille et leur dureté, l'évaluation de la surface des empreintes s'en trouve améliorée [33, 38].

C'est sur des sols consolidés de prairie temporaire ou permanente représentatifs pour les **pneumatiques de transport** avec profils Traction, Ribb, A.W. et Flotation (fig. 10b-e) que les mesures sont effectuées. En présence d'un matelas racinaire dense, l'horizon supérieur s'est révélé toujours ferme (résistance à la pénétration ≥ 8 kg). De ce fait, les sols tendres à mi-durs ne sont pas considérés [32]. La distinction de la structure diagonale ou radiale du pneumatique a trouvé cependant toute son importance [32]. Les mesures montrèrent en outre qu'il était nécessaire de regrouper les pneumatiques d'après leur taille. Les pneumatiques de transport, de structure diagonale ou radiale sont ainsi subdivisés en pneumatiques de petite (largeur < 50 cm) et de grande taille (largeur ≥ 50 cm).

Les mesures sur le terrain indiquent à l'évidence qu'avec les mêmes pneumatiques, lorsque le sol est plus tendre, ou lorsque la pression de gonflage diminue, la surface de l'empreinte augmente. Des résultats de mesure ont toutefois indiqué que dans des cas exceptionnels, l'inverse restait possible. La consistance du sol et la rigidité du pneumatique travaillent de concert. Lorsque le sol est plutôt dur, les pneumatiques vont devoir réagir et se déformer. Lorsque le sol est plutôt tendre, le pneumatique est moins porté à se déformer. La surface de l'empreinte peut donc être parfois plus petite [32, 38]. Par ailleurs, pour qu'un pneumatique puisse inéluctablement se déformer lorsque la pression de gonflage diminue, la roue doit être dotée d'une charge minimale.



Important : TASC ne génère des résultats fiables que si les charges retenues atteignent au minimum 50 % des valeurs maximales autorisées à 10 km/h.

La pression de contact moyenne n'est autre que le quotient « charge à la roue (chenille) / surface de l'empreinte ». Pour les chenilles en caoutchouc, les pressions de contact partielles peuvent différer de la moyenne en raison des galets d'appuis, du relief du terrain, de la hauteur de l'attelage [34, 35]. D'importantes variations de charge peuvent se manifester entre l'avant et l'arrière des chenilles durant un effort de traction en raison du couple à l'attelage.



Important : la pression de contact varie beaucoup entre la zone directement sous les crampons et la zone entre les crampons. Les contraintes de charge ne peuvent être interprétées de ce fait qu'à partir d'une profondeur de 10 à 15 centimètres.



Important : pour les châssis à chenilles, veiller à une tension suffisante des chenilles et à une hauteur optimale du point de l'attelage. Sans travail de traction, le tracteur à chenille « pique du nez ».



Attention : les algorithmes utilisés pour calculer la surface de l'empreinte proviennent exclusivement de mesures effectuées avec des **pneumatiques agricoles**. Compte tenu de la rigidité et de la pression de gonflage supérieures du pneumatique forestier, les contraintes calculées peuvent être sous-estimées.

3.3.6 Nombre de passages

Les résultats TASC sont valables pour **un seul passage** (charge maximale imprimée 2 fois tout au plus), comprenant au même endroit le foulage de 2 voire 3 pneumatiques. On observe un effet cumulatif lorsque le nombre de passages successifs augmente avec des charges maximales. La contrainte de charge dans le sol à 40 cm augmente alors de 10 à 40 % suivant le nombre de passages [39].

La circulation dans les **voies de passage** (cultures de céréales, plantes sarclées) peut être facilement vérifiée avec TASC. Il faut seulement s'attendre à ce que la dureté du sol soit plus élevée dans les voies de passage que sur le sol non foulé. TASC ne tient pas compte des **passages répétés** (chaintres, voies de passage dans les champs à céréales, à plantes sarclées, opérations de débardage en bordure de champ).



Important : une **profondeur maximale** des ornières ne dépassant pas **6 à 7 cm** est recommandée pour éviter toute déformation au niveau de la semelle de labour sur sol agricole. En forêt, une profondeur ne dépassant pas **10 cm** est recommandée (§ 3.2.1).

3.3.7 Vitesse

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. La différence entre le tassement instantané et le tassement maximal (atteint en laboratoire après 24 heures de soumission à une force statique donnée) est inférieure pour les sols humides à fraction grossière que pour les sols humides à fraction fine. Pour les sols non consolidés, à charge égale, un sol sableux atteindra son seuil de déformation maximale plus rapidement donc qu'un sol argileux. On peut 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 [40].

3.4 Validation

La validation du premier module de l'application TASC se base sur les valeurs indicatives de densité apparente effective et de macroporosité (\varnothing 50 μm , pF 1.8) du sol [3] proposées par la Société Suisse de Pédologie pour la mise en application de l'ordonnance sur les atteintes portées au sol (OSol du 1^{er} juillet 1998). Ces valeurs se montent pour la densité apparente effective à 1.7 g/cm³ (éq. 3) et 1.5 g/cm³ respectivement pour les sols agricoles et forestiers alors que celles de la macroporosité s'élèvent à 7%, respectivement 10% [6]. Petelkau propose en outre une valeur indicative inférieure de 0.1 g/cm³ dans la fraction supérieure du sol, assurant à la plante et ceci dans l'horizon travaillé une disponibilité optimale meilleure en eau et en oxygène [41].

En raison de l'étroite corrélation observée entre la préconsolidation à la capacité au champ (sol drainé, pores grossiers ressuyés) et la densité apparente effective (fig. 3, § 3.1.2) [16], les contraintes limites de préconsolidation ou valeurs limites de stabilité mesurées pour différentes classes de texture correspondent à la valeur indicative de densité apparente effective. Les données de Lebert [17] permettent de fixer les seuils de stabilité compte tenu de la texture et de l'humidité du sol. Les valeurs de stabilité sont répertoriées dans le tableau 3a-b (§ 3.1.2).

Ni les valeurs limites de stabilité, ni les valeurs de densité et de macroporosité mesurées avant et après le passage des machines, indépendantes les unes des autres, n'interviennent directement dans le modèle de calcul de propagation des contraintes de charge. De ce fait, une validation de l'estimation des risques (dégâts sévères de compactage oui/non) reste possible. Cette validation ne prend en compte que les sols agricoles.

L'application TASC distingue deux situations :

Aucun risque de compactage sévère n'est à déplorer lorsque la contrainte de charge calculée à la profondeur de la prise des échantillons de sol est égale voire inférieure au point limite de stabilité (tab. 4a-b).

Risque de compactage sévère lorsque la contrainte de charge calculée à la profondeur correspondant aux analyses de sol est supérieure à la valeur limite de stabilité (tab. 4a-b).

Il y a **concordance** seulement si les résultats de l'application correspondent aux mesures des analyses de sol (densité apparente effective, macroporosité moyenne). Si la valeur moyenne de la densité apparente effective dépasse la valeur indicative (1.7 g/cm³) ou si la macroporosité moyenne est inférieure à 7% avant le passage des machines, il n'est plus possible alors d'évaluer les concordances entre l'application et les mesures, le sol étant pré-consolidé. Aucune mesure n'est alors valable.

73 des 93 situations sur les 15 sites ont pu être validées avec TASC (tab. 9). Dans les 20 autres cas, le sol s'est avéré surconsolidé avant même le passage des machines, trois fois dans la couche superficielle du sol, douze fois entre 35 et 40 centimètres et cinq fois entre 55 et 60 cm (tab. 9).

Quatre cas de figure sont ici présentés :

Cas 1 - évaluation de la consistance et de la texture du sol à partir de classes - La concordance générale est de 78 % dans le sol et de plus de 90 % dans le sous-sol. Avec une déduction de 0,1 g/cm³ pour la couche superficielle du sol selon Petelkau [41] (valeur indicative pour la couche superficielle du sol de 1,6 au lieu de 1,7 g/cm³), la concordance pour la couche superficielle du sol passe de 60 % à 75 %. Le compactage se produit plus rapidement. Le nombre de message erronés „Sol compacté“ diminue. Le taux de concordance augmente.

Cas 2 et 3 – lorsque les teneurs en argile et en limon caractérisent la texture du sol (tab. 9), les valeurs limites de stabilité diminuent. Le contrôle gagne en ce sens en rigueur (§ 3.1.2). Le message avertisseur « Risque de compactage sévère oui » est alors plus fréquent, sans que le sol ne se déforme pour autant. Le degré de concordance diminue.

Cas 4 - avec des mesures précises de résistance à la pénétration (consistance du sol), la fiabilité du calcul des risques n'est sensiblement meilleure qu'en surface (avec pour valeur indicative 1.7g/cm³). Le nombre de mesures étant inférieur dans le cas 4 (30) par rapport au cas 1 (73), une retenue est de rigueur quant à l'interprétation des résultats.

Tableau 9 : validation de l'application TASC

	Sol superficiel 10–15 cm		Sous-sol 35–40 55–60 cm		Moyenne sol sup. et sous-sol		Moyenne sous-sol
valeurs indicatives [g/cm ³]	1,7	1,6*	1,7	1,7	1,7	1,6*	1,7
Cas 1 – Consistance du sol en surface_{classe} / Texture du sol_{classe} **							
nb total de mesures	33	33	35	25	93	93	60
nb de mesures valables	30	24	23	20	73	67	43
nb cas concordants	18	18	20	20	58	58	40
concordance en %	60.0	75.0	87.0	100	78.1	85.1	93.0
Cas 2 – Consistance du sol en surface_{valeur} / Texture du sol_{valeurs}							
nb total de mesures	15	15	15	9	39	39	24
nb de mesures valables	13	13	11	6	30	30	17
nb cas concordants	7	8	7	6	20	21	13
concordance en %	53.9	61.5	63.6	100	66.7	70	76.5
Cas 3 - Consistance du sol en surface_{classe} / Texture du sol_{valeurs}							
nb total de mesures	33	33	35	25	93	93	60
nb de mesures valables	31	24	23	20	74	67	43
nb cas concordants	17	18	13	20	50	51	33
concordance en %	54.8	75.0	56.5	100	67.6	76.1	76.7
Cas 4 - Consistance du sol en surface_{valeur} / Texture du sol_{classe}							
nb total de mesures	15	15	15	9	39	39	24
nb de mesures valables	13	13	11	6	30	30	17
nb cas concordants	8	8	8	6	22	22	14
concordance en %	61.5	61.5	72.7	100	73.3	73.3	82.4

* valeur indicative de la densité effective (masse volumique) en surface 1.6 g/cm³ après correction [21].

** classe : regroupement en catégories

Un total de 207 cas valables sont vérifiés. Le message « **Compactage / non** » n'est jamais apparu pour des échantillons « à problèmes » fortement tassés suite à de lourdes charges, alors même que le potentiel hydrique dans le sous-sol soit inférieur à < 63 hPa dans 98 % des cas. Lorsqu'aucun risque n'est pronostiqué à une profondeur donnée du sol, on peut être assuré qu'il n'y aura effectivement aucun compactage. En outre, les tassements excessifs éventuels sont prévisibles de manière irréfutable. L'évaluation de la vulnérabilité du sol est sûre.



Important : comme le sous-sol entre 35 et 40 cm et entre 55 et 60 cm s'est avéré maintes fois compacté avant passage des machines dans 34 % et 20 % des cas respectivement, il est donc nécessaire de contrôler les charges avant toute intervention au champ, afin de protéger le sol à titre préventif.

4. Module 2 – traction, énergie et patinage

Lorsqu'un pneumatique est soumis à un travail de traction, des forces interactives se manifestent sur l'interface de contact ; sol et pneumatique se déforment. Sous l'effet du patinage, les agrégats peuvent être brisés avant d'être déplacés vers l'arrière. Une pellicule instable, facilement érodable se forme en surface, au-dessous de laquelle le sol est généralement compacté voire cisailé à son tour. Il s'agit dès lors de maîtriser le patinage, de le diminuer autant que possible compte tenu de la force de traction requise. Les atteintes au sol sont ainsi réduites. Le système poral du sol est ménagé. Les rendements sont stimulés, la consommation de carburant diminue, la longévité des pneumatiques augmente.

Le second module TASC « Traction, énergie et patinage » donne réponse sur la force de traction, la consommation d'énergie, le patinage avec son seuil limite à partir duquel le sol est irréversiblement cisailé. En paramétrisant sol et machines on obtient la courbe classique donnant le patinage en fonction de la force de traction avec seuil limite de cisaillement. Pour les outils attelés travaillant le sol, les valeurs relatives aux besoins de traction ASABE [9] tiennent lieu de référence.

4.1 Considérations générales

Le modèle proposé par Osetinsky et Shmulevich (2004) [42] est à la base des calculs de ce module. La simulation se divise en trois étapes : (i) la détermination de l'interface sol-pneumatique – (ii) la répartition des contraintes sur la surface de l'empreinte et (iii) le calcul de la force de traction nette, de la force de traction totale, de la résistance du sol, du couple et de la puissance de traction au point d'attelage et à la roue (fig. 13). Le modèle convient pour les véhicules à deux comme à quatre roues motrices, avec transfert de charge de l'essieu avant à l'essieu arrière lors d'un effort de traction (charge dynamique variable à la roue). Le calcul du seuil de cisaillement s'ajoute au modèle de calcul de Osetinsky et Shmulevich.

La bande de roulement du pneumatique étant pourvue de crampons, des pressions différentes se manifestent au niveau de la surface de l'empreinte. Pour calculer au mieux la force de traction, il faudrait non seulement tenir compte de la résistance de contact sol-crampons, mais également de la résistance passive des éléments du sol entre les crampons [43]. La simulation ne tient pas compte de cette résistance passive. Les hypothèses suivantes ont été posées :

- L'interface sol-pneumatique (surface de l'empreinte) prend en compte les crampons et la zone intercrampon, sans distinction
- L'interaction pneumatique-sol est bidimensionnelle. La profondeur de l'ornière reste constante sur la largeur du pneumatique comme sur la largeur de la surface de l'empreinte
- Le sol est considéré comme un corps plastique, non linéaire (valable plutôt pour le sol superficiel)
- Le pneumatique est considéré comme un corps élastique, sa déformation est linéaire, proportionnelle à la pression de gonflage
- La vitesse d'avancement reste constante et faible (pas d'effet bulldozer)
- Etant donné la faible prépondérance des tracteurs testés (principalement < 1 %), on admet que les taux de patinage sont les mêmes pour les roues avant et arrière
- Le tracteur roule à plat.

Les expressions mathématiques avec références bibliographiques sont ici présentées.

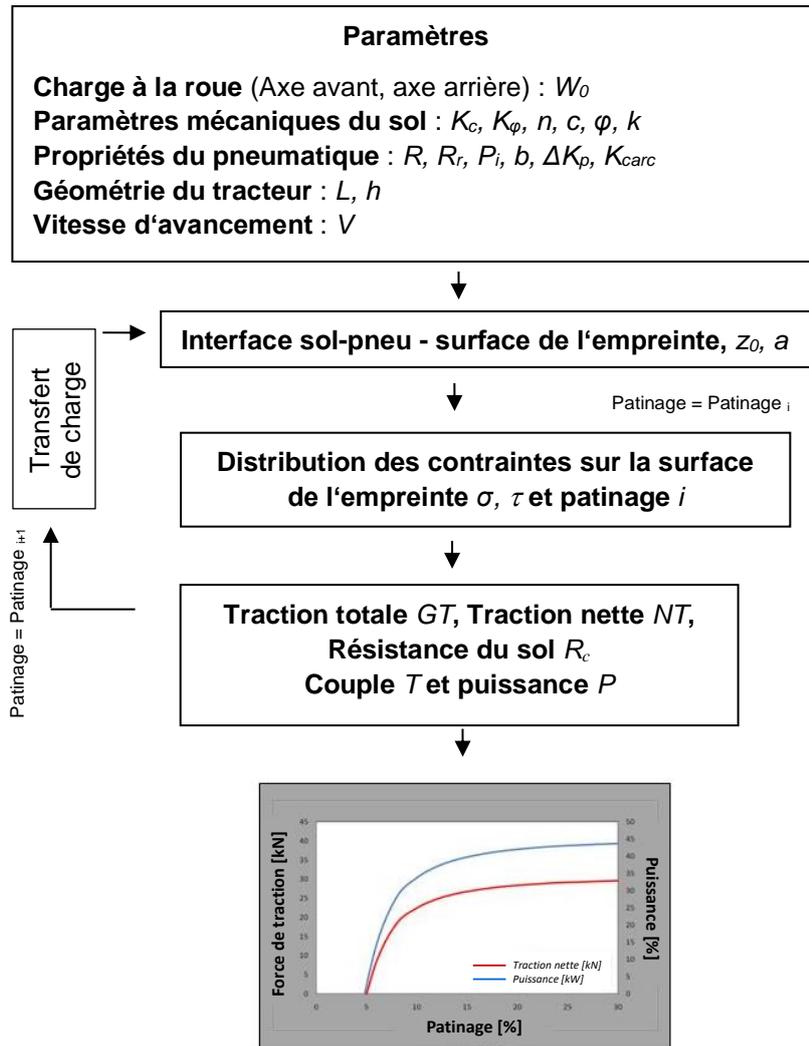


Fig. 13 : organigramme – calcul de la puissance tractive [44].

4.1.1 Détermination de l'interface sol-pneumatique - surface de l'empreinte

Selon la théorie de Bekker [45], les contraintes verticales agissant sur l'interface sol-pneumatique (surface de l'empreinte) sont semblables à la pression verticale d'une assiette circulaire pénétrant le sol à une même profondeur (éq. 4) :

$$p_s = \left(\frac{K_c}{b} + K_\phi \right) z^n \quad \text{Eq. 4}$$

sachant que p_s est la pression verticale sous l'assiette circulaire de diamètre b , (b vaut également pour la largeur des pneumatiques), z la profondeur d'enfoncement de l'assiette, n l'exposant lié à

l'enfoncement, K_c , K_φ respectivement le module de cohésion et le module de friction de la déformation du sol.

La composante verticale de la réaction du sol doit être équilibrée par rapport à la charge à la roue W (éq. 5) :

$$W = \int_0^{x_0} p_s b dx \quad \text{Eq. 5}$$

x_0 est la longueur de projection de la surface de l'empreinte sur l'abscisse (fig. 59).

Dans ce modèle, la surface de l'empreinte prend la forme d'une parabole. La profondeur d'enfoncement z est une fonction des coordonnées en x :

$$z = z_0 - ax^2 \quad \text{Eq. 6}$$

z_0 est la profondeur maximale de l'ornière et a , un coefficient qui caractérise la courbe de la fonction parabolique (fig. 14).

L'intégrale (éq. 5) se résout avec une extension du deuxième terme z_0 de l'équation 6 selon Wong [45]. On obtient (éq. 7) :

$$W = \frac{K_c + bK_\varphi}{3} z_0^n \sqrt{\frac{z_0}{a}} (3-n) \quad \text{Eq. 7}$$

La charge à la roue se calcule en tenant compte non seulement des modules de déformation du sol mais aussi de la rigidité des pneumatiques (conditions similaires d'équilibre) (éq. 7 et éq. 12).

La rigidité d'un pneumatique se calcule selon Lines et Murphy [46] en faisant la somme de deux composantes, la rigidité de la carcasse K_{carc} et le produit $\Delta K_p P_i$. ΔK_p donne la rigidité par rapport à la pression de gonflage P_i . K_v est le coefficient de rigidité vertical du pneumatique par unité de longueur de l'empreinte. La charge à la roue W peut être décrite comme suit (éq. 8) [42] :

$$W = \int_0^{x_0} K_v \delta dx \quad \text{Eq. 8}$$

sachant que δ exprime la déformation verticale du pneumatique, l'équation 9 donne alors la rigidité verticale:

$$K_v = \frac{W}{R^2 \arcsin\left(\frac{x_0}{2R}\right) - \frac{x_0}{2} \left(R - \frac{W}{K_{carc} + \Delta K_p P_i}\right)} \quad \text{Eq. 9}$$

L'équation 10 et l'équation 11 indiquent la déformation δ respectivement l'excentricité e_0 du milieu de la roue au point postérieur de la surface de l'empreinte (fig. 59) :

$$\delta = \sqrt{R^2 - (x - e_0)^2} - \sqrt{R^2 - e_0^2} + ax^2 \quad \text{Eq. 10}$$

R est le rayon du pneu sans charge.

$$e_0 = \frac{x_0}{2} \left[1 - a \left(\sqrt{1 + (ax_0)^2} - x_0^2 \right) \right] \quad \text{Eq. 11}$$

En tenant compte des équations 9, 10 et 11, le calcul intégral de l'équation 8 donne la solution analytique suivante (équ. 12) :

$$W = K_v \left\{ \frac{ax_0^3}{3} - \sqrt{R^2 - e_0^2} \left(x_0 - \frac{e_0}{2} \right) + \frac{x_0 - e_0}{2} \sqrt{R^2 - (x_0 - e_0)^2} + \frac{R^2}{2} \left[\arcsin \left(\frac{x_0 - e_0}{R} \right) + \arcsin \left(\frac{e_0}{R} \right) \right] \right\} \quad \text{Eq. 12}$$

Il n'y a pas de solution explicite, mais seulement des solutions implicites pour déterminer à partir des deux équations 7 et 12, la profondeur maximale de l'ornière z_0 et le coefficient a pour caractériser l'évolution de la parabole.

La surface de l'empreinte avec longueur maximale x_0 est calculée à partir de l'équation 6.

Si $z = 0$ alors $x = x_0$, soit pour la surface de l'empreinte A (équ. 13) :

$$A = b \cdot \sqrt{\frac{z_0}{a}} \quad \text{Eq. 13}$$

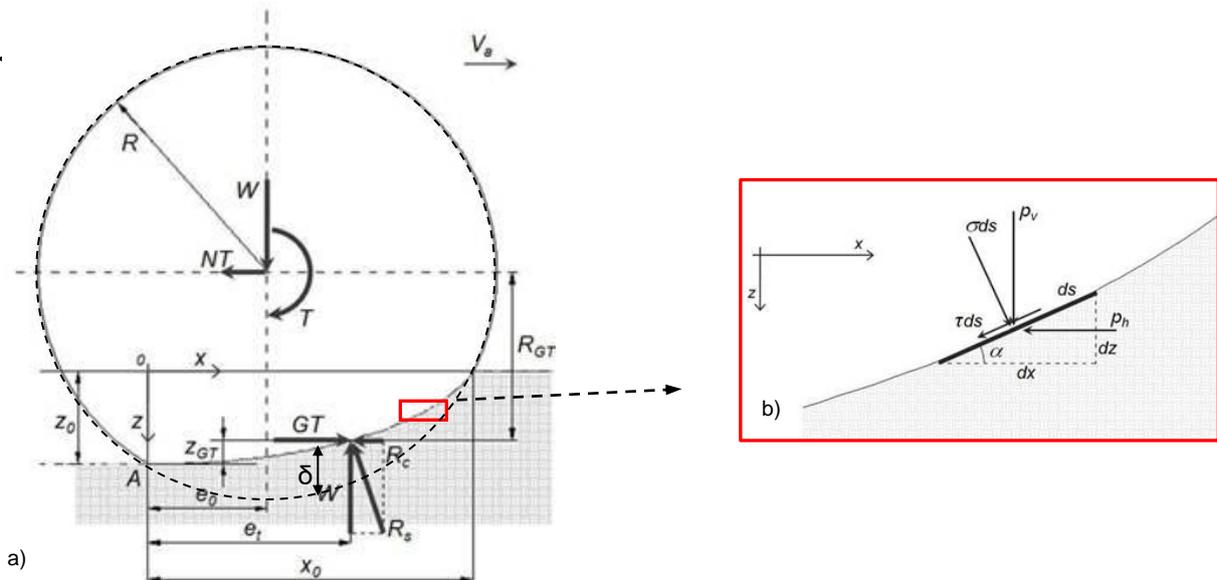


Fig. 14 : a) Interactions entre le sol et le pneumatique de traction ; b) forces élémentaires agissant sur le sol [47].

4.1.2 Répartition des contraintes sur la surface de l'empreinte et patinage

Pour calculer la force de traction totale GT , il faut déterminer les forces élémentaires avec leurs composantes horizontales p_h et verticales p_v (fig. 14) :

$$p_h = (\sigma ds) \sin \alpha - (\tau ds) \cos \alpha \quad \text{Eq. 14}$$

$$p_v = (\sigma ds) \cos \alpha + (\tau ds) \sin \alpha \quad \text{Eq. 15}$$

ds est la surface infinitésimale de l'empreinte, α est l'angle entre la tangente de la surface infinitésimale de l'empreinte et l'abscisse. σ et τ correspondent à la contrainte normale, resp. à la contrainte de cisaillement à l'interface sol-pneumatique. En outre, conformément à la figure 14 :

$$ds \sin \alpha = b dz \quad \text{Eq. 16}$$

$$ds \cos \alpha = b dx \quad \text{Eq. 17}$$

Les équations 16 et 17 permettent de réécrire les équations 14 et 15 :

$$\frac{p_h}{b dx} = \sigma \frac{dz}{dx} - \tau \quad \text{Eq. 18}$$

$$\frac{p_v}{b dx} = \sigma_v = \sigma + \tau \frac{dz}{dx} \quad \text{Eq. 19}$$

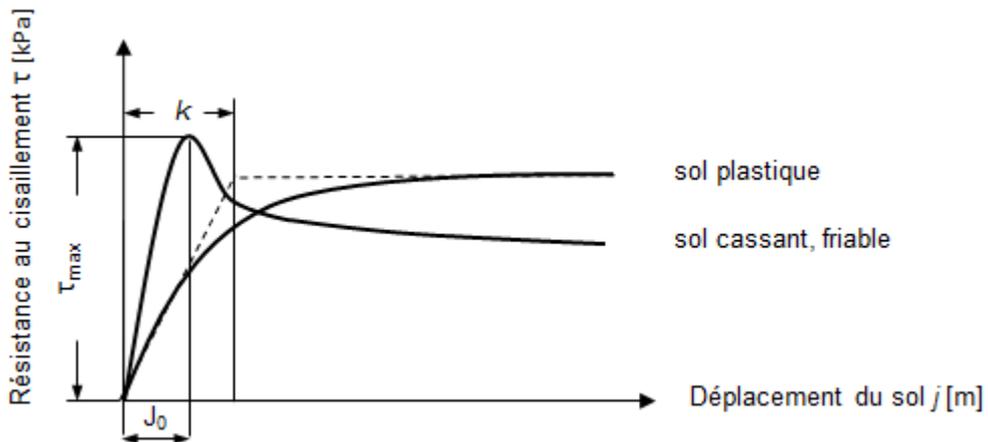


Fig. 15 : résistance au cisaillement et déplacement des agrégats de deux sols de structure différente soumis à une même contrainte verticale [44].

Lorsque le sol est soumis à une contrainte de cisaillement, cette force augmente dans un premier temps sans que le sol pour autant ne se déplace. En raison de sa résistance au cisaillement, le sol se déforme à peine. Si la force de cisaillement dépasse cette résistance, le sol cède, se « déchire ». Le point de rupture est particulièrement net sur les sols friables. Sur les sols lourds, plastiques, la transition apparaît de manière plus diffuse (fig. 15).

Selon Janosi et Hanamoto [48], la contrainte de cisaillement peut être décrite comme suit (éq. 20) :

$$\tau = (c + \sigma \tan \varphi) (1 - e^{-j/k}) \quad \text{Eq. 20}$$

En tout point de la surface de l'empreinte, la contrainte de cisaillement τ dépend de la contrainte normale σ , de la cohésion c , de l'angle de frottement interne φ , du module de cisaillement k et du déplacement du sol j , suite de la rupture.

Pour calculer la contrainte de cisaillement τ , il faut également définir la contrainte normale σ en tout point de la surface de l'empreinte (éq. 21) :

$$\sigma = \frac{\sigma_v - c(1 - e^{-j/k}) 2ax}{1 + \tan \varphi (1 - e^{-j/k}) 2ax} \quad \text{Eq. 21}$$

sachant que les équations 19 et 22 s'appliquent pour la composante verticale σ_v :

$$\sigma_v = \frac{dp_v}{bdx} = \frac{K_v \delta}{b} \quad \text{Eq. 22}$$

La rigidité verticale du pneu K_v , la déformation δ et par conséquent l'excentricité du milieu de la roue e_o peuvent être déduites des équations 9, 10, respectivement 11.

Pour déterminer la contrainte de cisaillement τ il faut enfin calculer le déplacement du sol dû au cisaillement j . Il est possible de le déduire à partir de l'intégrale de la vitesse de patinage V_j par le temps t (éq. 23) :

$$j = \int_0^t V_j dt \quad \text{Eq. 23}$$

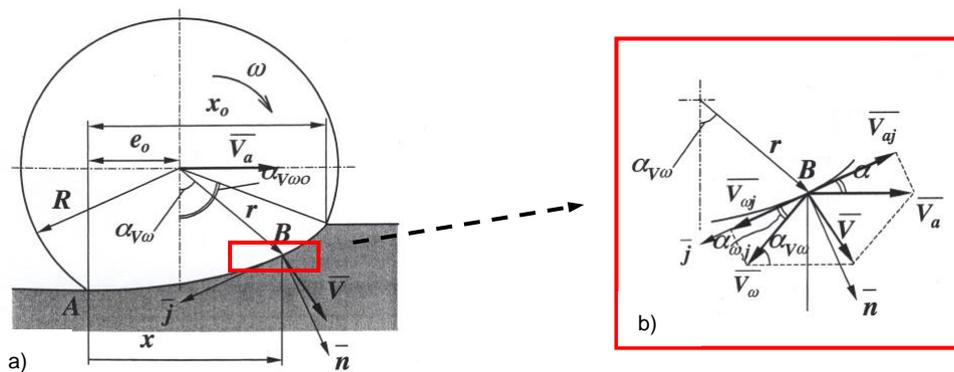


Fig. 16 : cinématique d'une roue en rotation - a) vitesse absolue \vec{V} à un point B de la circonférence ; b) vitesse de patinage \vec{V}_j . [42].

La figure 16 représente les vecteurs de vitesse et leurs composantes. La vitesse absolue V d'un point B de la circonférence de la roue est égale à la somme de la vitesse actuelle V_a et de la vitesse V_ω relative au milieu de la roue (éq. 24) :

$$V = V_a + V_\omega \quad \text{Eq. 24}$$

La valeur de la vitesse de patinage V_j peut être déduite de la somme des projections tangentielles des deux composantes $V_{\omega j}$ et V_{aj} (fig. 16) (éq. 25) :

$$V_j = V_{\omega j} - V_{aj} \quad \text{Eq. 25}$$

où (éq. 26) :

$$V_j = \omega r \cos \alpha_{\omega j} - V_a \cos \alpha \quad \text{Eq. 26}$$

r est le rayon vecteur du milieu de la roue, $\alpha_{\omega j}$ l'angle entre le vecteur de vitesse lié au centre de la roue et sa projection sur l'axe j et α l'angle entre le vecteur de la vitesse actuelle V_a (abscisse) et la tangente au point B. La vitesse angulaire ω se définit comme suit (éq. 27) :

$$\omega = \frac{d(\alpha_{V\omega})}{dt} \quad \text{Eq. 27}$$

A partir des équations 23, 26 et 27, on obtient l'équation 28 pour le déplacement du sol dû au cisaillement j :

$$j = \int_{\alpha_{V\omega}}^{\alpha_{V\omega 0}} \left(r \cos \alpha_{\omega j} - \frac{V_a}{\omega} \cos \alpha \right) d(\alpha_{V\omega}) \quad \text{Eq. 28}$$

Comme il n'est pas possible d'obtenir une solution analytique à partir de l'intégrale 28, le déplacement de sol j peut être déduit par approximation numérique [42] (éq. 29) :

$$j = \int_x^{x_0} \frac{\left[ax(x - 2e_0) + \sqrt{R^2 - e_0^2} - \frac{V_a}{\omega} \right] \left[ax(x - 2e_0) + \sqrt{R^2 - e_0^2} \right]}{\sqrt{1 + (2ax)^2} \left[\left(\sqrt{R^2 - e_0^2} - ax^2 \right)^2 + (x - e_0)^2 \right]} dx \quad \text{Eq. 29}$$

Le patinage i peut être déduit de la vitesse actuelle V_a et de la vitesse angulaire ω , sous-composantes de l'équation 29 (éq. 30) :

$$i = \frac{\omega R_r - V_a}{\omega R_r} \quad \text{Eq. 30}$$

sachant que R_r est le rayon sous charge.

Traction quatre roues, différentiel bloqué, le patinage i_f de l'essieu avant se calcule comme suit avec i_r pour le patinage de l'essieu arrière (éq. 31) :

$$i_f = 1 - \frac{(1 - i_r)}{K_s} \quad \text{Eq. 31}$$

sachant que K_s est le rapport théorique de vitesse (éq. 32 et 33) :

$$K_s = \frac{\omega_f r_f}{\omega_r r_r} = \frac{(1 - i_r)}{(1 - i_f)} \quad \text{Eqs. 32-33}$$

Le modèle considère le cas idéal avec une prépondérance = 0. La vitesse théorique de la roue avant $\omega_f r_f$ et de la roue arrière $\omega_r r_r$ est la même ($K_s = 1$). De suite, le patinage de l'essieu avant i_f ne se distingue pas de celui de l'essieu arrière i_r .

4.1.3 Force totale, force de traction, couples et puissance

La force de traction totale GT peut être déduite approximativement par l'intégrale de la force élémentaire p_h sur la surface totale de l'empreinte (éq. 34) [42] :

$$GT = \int_0^{x_0} p_h \quad \text{Eq. 34}$$

Compte tenu des équations 14, 16, 17, 20 et 21, il est possible de réécrire l'équation 34 comme suit (éq. 35) :

$$GT = \int_x^{x_0} \frac{\sigma_v [2ax - \tan \varphi (1 - e^{-j/k})] - c(1 - e^{-j/k}) [(2ax)^2 + 1]}{1 + 2ax(1 - e^{-j/k}) \tan \varphi} b dx \quad \text{Eq. 35}$$

La composante horizontale de la réaction du sol R_s (fig. 59) est la résistance du sol R_c suite au compactage. Lorsque les ornières sont plutôt peu profondes, comme c'est le cas dans cette étude, l'effet dit bulldozer reste limité voire négligeable.

La résistance du sol au tassement dépend des propriétés du sol K_c , K_φ , de la largeur des pneumatiques b , de la profondeur maximale de l'ornière z_0 . p_s est déterminé par l'équation 4. Après intégration de l'équation 36, on obtient l'équation 37 :

$$R_c = \int_0^{z_0} p_s b dz = (K_c + bK_\varphi) \frac{z_0^{n+1}}{n+1} \quad \text{Eqs. 36-37}$$

La résistance du sol au tassement provoque une déformation du pneumatique (affaissement). La force de traction nette NT se calcule en faisant la différence entre la force de traction totale GT et la résistance du sol au tassement R_c (éq. 38) :

$$NT = GT - R_c \quad \text{Eq. 38}$$

Le coefficient de traction μ_{tr} est le rapport entre la force de traction nette NT_{tr} et le poids du tracteur W_{tr} (éq. 39) [44, 49] :

$$\mu_{tr} = \frac{NT_{tr}}{W_{tr}} \quad \text{Eq. 39}$$

Ce coefficient μ_{tr} tient lieu de paramètre pour évaluer le potentiel de traction d'un tracteur.

La composante verticale W de la réaction du sol R_s (fig. 59) s'équilibre avec la charge à la roue de manière excentrique par rapport au milieu de la roue ($e_t - e_0$). Les deux composantes génèrent un couple M_r (éq. 40) dans le sens opposé au couple de la roue motrice M_{GT} (éq. 41) :

$$M_r = W(e_t - e_0) \quad \text{Eq. 40}$$

$$M_{GT} = GT \cdot R_{GT} \quad \text{Eq. 41}$$

sachant que R_{GT} est la distance entre le milieu de la roue et le point d'impact de la force de traction GT sur la roue (fig. 59). Pour l'équation 40, on recherche e_t . A partir de l'équation 8, on obtient (éq. 42) :

$$We_t = \int_0^{x_0} K_v \delta x dx \quad \text{Eq. 42}$$

avec e_t :

$$e_t = \frac{K_v}{W} \left\{ \frac{z_0^2}{4a} + \frac{\sqrt{R^2 - (x_0 - e_0)^2}}{3} \left[(x_0 - e_0) \left(x_0 + \frac{e_0}{2} \right) - R^2 \right] + \frac{\sqrt{R^2 - e_0^2}}{3} \left(R^2 + \frac{e_0^2}{2} - \frac{3}{2} x_0^2 \right) + \frac{R^2 e_0}{2} \left[\arcsin \left(\frac{x_0 - e_0}{R} \right) + \arcsin \left(\frac{e_0}{R} \right) \right] \right\} \quad \text{Eq. 43}$$

Pour l'équation 41, on recherche R_{GT} (éq. 44) :

$$R_{GT} = \sqrt{R^2 - e_0^2} - z_{GT} \quad \text{Eq. 44}$$

Le point z_{GT} est déduit de l'équilibre du couple de la surface infinitésimale de l'empreinte (éq. 45) :

$$z_{GT} = \frac{1}{GT} \int_0^{x_0} \tau b z dx \quad \text{Eq. 45}$$

A partir des équations 6 et 20, on considère que (éq. 46) :

$$z_{GT} = \frac{1}{GT} \int_0^{x_0} (c + p_s \tan \varphi) (1 - e^{-j/k}) (z_0 - ax^2) b dx \quad \text{Eq. 46}$$

Comme pour l'équation 35, on procède à une approximation numérique pour l'équation 46.

Le couple total T est la somme des couples, l'un lié aux roues motrices M_{GT} , l'autre lié au couple résistant M_r (éq. 47) :

$$T = M_{GT} + M_r \quad \text{Eq. 47}$$

Les équations 38 et 47 permettent de calculer la puissance nette de traction P_{NT} (éq. 48) au point d'attelage et la puissance générée par la roue P_{GT} (éq. 49) :

$$P_{NT} = NT \cdot V_a \quad \text{Eq. 48}$$

$$P_{GT} = T \cdot \omega \quad \text{Eq. 49}$$

La consommation en énergie s'obtient à partir de la puissance de traction, caractérisée notamment par l'efficacité de la puissance de traction η_{tr} [44, 49]. Il s'agit du rapport entre l'énergie appliquée au point d'attelage (output) et l'énergie nécessaire au niveau des roues (input) (éq. 50) :

$$\eta_{tr} = \frac{NT_{tr} \cdot V_a}{\sum T \cdot \omega} \quad \text{Eq. 50}$$

4.1.4 Puissance du moteur et consommation de carburant

La consommation de carburant est directement liée à la puissance du moteur (régime et couple), puissance se répercutant dans une proportion définie au niveau des roues (éq. 49). Lorsque le régime du moteur augmente, la puissance s'accroît avec un couple donné. Sur les tracteurs modernes surpuissants, la puissance maximale se situe toutefois en dessous du régime nominal. Au régime nominal, la puissance utile et la consommation horaire de carburant B_e [l/h] sont à leur niveau maximum. La consommation spécifique minimale b_{eM} [g/kWh] s'obtient à un taux d'utilisation d'énergie d'environ 80 % et à un régime correspondant à environ 70 % du régime nominal [50]. En termes de conduite, atteindre cette plage et y rester ne dépend ni uniquement du moteur, ni uniquement du conducteur, mais également des contraintes de traction dues à l'outil et des pertes dues au tracteur. Pour un travail de traction par exemple, le conducteur influe sur le régime du moteur en choisissant les vitesses et par là-même le nombre de tours minute.

Pour calculer des valeurs de consommation de carburant fiables, les valeurs de référence choisies proviennent du cycle de mesures normalisé ISO 8178C1. Le cycle décrit huit points de mesure de la consommation spécifique de carburant. Ces points de mesure font référence au couple et sont soumis à une pondération [50].

La consommation spécifique de carburant b_{eM} générée par le moteur d'après la norme ISO diffère selon la classe de puissance du moteur (tabl. 10) [51] :

Tableau 10 : consommation spécifique de carburant b_{eM} générée par le moteur d'après la norme ISO 8178 C1 [50]

Classes de puissance des tracteurs	b_{eM} [g/kWh]
≤ 75 kW	248
>75 kW	223

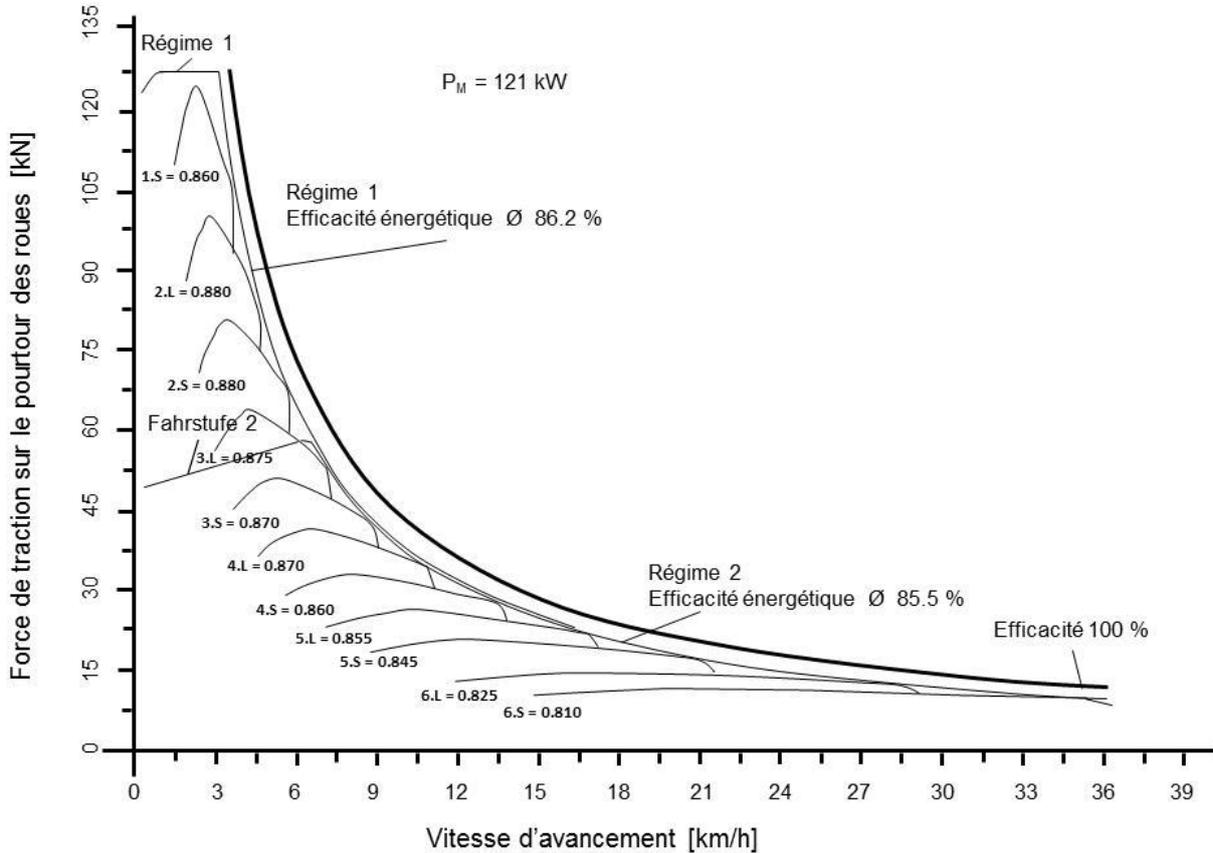


Fig. 17 : comparaison des forces à la périphérie des roues – boîte à vitesse powershift Fendt LS 615 versus transmission continue Vario Tristat-FWA 285S (Régime 1 et 2) - 121 kW, $N = 2400$ tr·min⁻¹ – source : Fendt Chronik [52].

La puissance générée par la roue est calculée d'après l'équation 49. La puissance du moteur P_M s'obtient à partir de la puissance générée par les roues P_{GT} et du degré d'efficacité η_G (éq. 51) :

$$P_M = \frac{P_{GT}}{\eta_G} \quad \text{Eq. 51}$$

Que ce soit pour les boîtes à vitesse ou les boîtiers Vario, plusieurs auteurs proposent un degré d'efficacité η_G de 0,85 pour la transmission d'un moteur tournant à charge. (fig. 17) [52, 53, 54].

La consommation horaire de carburant B_e se calcule alors comme suit (éq. 52) :

$$B_e = P_M \cdot \frac{b_{eM}}{1000} \cdot \frac{1}{\delta_D} \quad \text{Eq. 52}$$

avec B_e pour la consommation horaire de carburant en [l/h], P_M pour la puissance du moteur [kW], η_G pour le degré d'efficacité de la transmission (0,85), b_{eM} pour la consommation spécifique de carburant liée au moteur [g/kWh] et δ_D pour le poids spécifique du diesel (0,831 kg/dm³ à 20 °C).

Parallèlement au paramètre η_{tr} de l'efficacité de la puissance de traction (éq. 50) et compte tenu de la puissance de traction nette P_{NT} , il est possible de déduire la consommation spécifique nette de carburant liée uniquement à la force de traction b_{eZ} , grandeur déterminante en matière d'efficacité énergétique et consommation de carburant (éq. 53) :

$$b_{eZ} = \frac{P_M \cdot b_{eM}}{P_{NT}} \quad \text{Eq. 53}$$

Le calcul a pour vocation d'évaluer l'importance de l'équipement du tracteur, de son outil de travail, de sa vitesse et des propriétés du sol sur la consommation d'énergie tout en ménageant le sol. Ce tool n'est pas approprié pour évaluer les besoins en carburant d'un tracteur A par rapport à un tracteur B nécessitant pour ce faire les diagrammes d'isoconsommation [55].

 **Important** : lors d'un travail de traction au champ, veiller à ce que la charge du moteur reste élevée mais pas maximale ; la consommation spécifique nette de carburant diminue. Rouler plutôt à des vitesses élevées, à faible taux de patinage et à régime modéré du moteur. L'efficacité de la transmission est alors maximale réduisant les pertes.

4.1.5 Charge dynamique et transfert de charge

Le modèle interactif sol-pneumatique s'applique aussi bien pour un véhicule à deux roues comme à quatre roues motrices [44]. La charge dynamique de l'essieu avant et de l'essieu arrière joue un rôle central dans le calcul de la force de traction. Le fait que le tracteur avance sans aucun effort de traction au point d'attelage, crée à lui seul déjà un transfert de charge de la roue avant vers la roue arrière en raison du couple généré par la roue arrière (un axe moteur). La roue arrière gagne en lest tandis que la roue avant s'allège. La répartition des charges n'est plus celle à l'état stationnaire initial ou statique. Lorsque pour la roue arrière, le point de contact GT sol-pneumatique se situe dans l'axe de la roue (cas le plus simple), on observe l'équilibre suivant (éq. 54) :

$$GT \cdot R_{r,r} = \Delta W \cdot L \quad \text{Eq. 54}$$

avec $R_{r,r}$ pour le rayon de la roue arrière sous charge, ΔW pour la variation de la charge à l'essieu entre l'état dynamique et stationnaire et L pour l'empattement (fig. 18).

Pour deux roues motrices, la formule générale se présente comme suit (éq. 55) :

$$\Delta W = \frac{T_r + NT_r (h - R_{r,r})}{L} \quad \text{Eq. 55}$$

avec T_r , pour le couple total, NT_r pour la force de traction nette de la roue arrière et h pour la hauteur de l'attelage. Lorsque la force de traction augmente, l'équilibre du tracteur évolue ; la charge se décale de l'essieu avant vers l'essieu arrière. Plus le point d'attelage est élevé, plus le transfert de la charge est important pour une force de traction nette donnée.

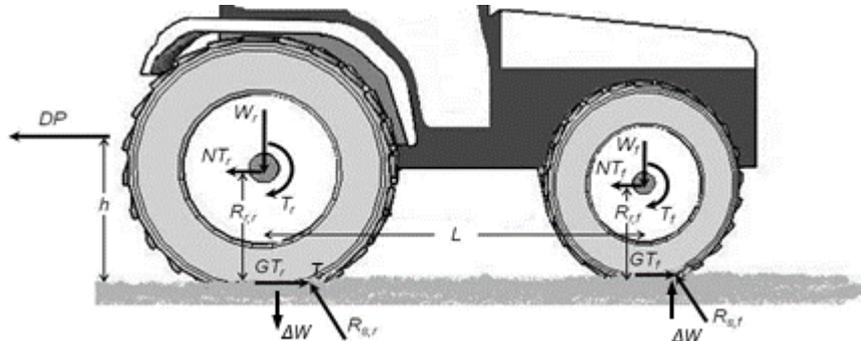


Fig. 18 : forces liées à un effort de traction pour un tracteur quatre roues motrices (DP : „drawbar pull“ ou force de traction nette – $R_{s/r}$: résistance du sol, roues avant/arrière) [44].

La formule générale donnant la variation de la charge à l'essieu ΔW pour quatre roues motrices est la suivante (éq. 56) :

$$\Delta W = \frac{T_f + T_r + (NT_f + NT_r)(h - R_{r,r}) + NT_f(R_{r,r} - R_{r,f})}{L} \quad \text{Eq. 56}$$

T_f , NT_f , $R_{r,f}$ et T_r , NT_r , $R_{r,r}$ pour le couple total, la force de traction nette et le rayon sous charge pour la roue avant, respectivement la roue arrière, h pour hauteur d'attelage et L pour l'empattement (fig. 18). On admettra dans les équations 54-56, un rayon sous charge constant et une profondeur de l'ornièrre négligeable [44].

Les équations 55-56 ne sont valables que si le vecteur de la force de traction (DP , fig. 18) reste horizontal, assurant au tracteur un poids total constant [44].

Comme la répartition des charges sur les deux essieux varie lorsque le patinage et la force de traction augmentent, la répartition des charges est alors recalculée à chaque degré de patinage (fig. 13). Pour obtenir la force de traction totale DP au point d'attelage, les forces de traction exercées sur les roues motrices sont additionnées [44].

4.1.6 Vulnérabilité du sol en surface et seuil de cisaillement

L'interaction du pneumatique et du sol génère un ensemble de forces normales et tangentielles à la surface du sol [44]. Il y a dégât lorsque le sol se brise sous l'effet d'un patinage trop élevé. Le sol présentant une résistance naturelle est à même de résister. Soumis à de faibles contraintes le sol revêt des propriétés élastiques, élastoplastiques. Si les contraintes en revanche dépassent le seuil de cisaillement, le sol perd son caractère élasto-plastique pour se rompre définitivement avant même d'être « pulvérisé » vers l'arrière. La déformation de nature plastique est complète voire irréversible (fig. 19). A patinage trop élevé, au-delà du seuil de résistance, le sol cède, il y a rupture (fig. 20).

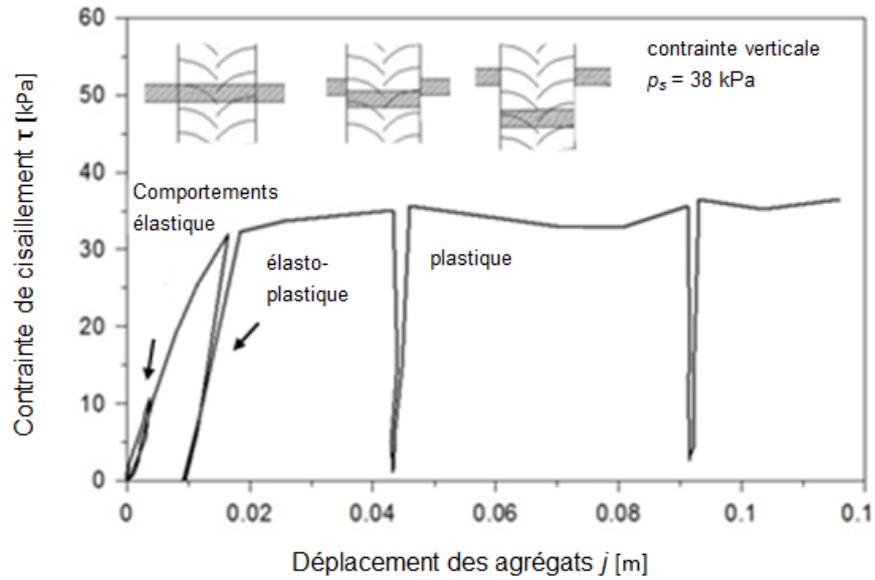


Fig. 19 : les trois comportements du sol: élastique, élasto-plastique et plastique après mesures répétées de cisaillement pour un silt limoneux. Mesures au bévamètre avec une pression verticale de 38 kPa [6, 44].

L'équation 57 de Mohr-Coulomb permet de définir le seuil de rupture (ou résistance de cisaillement) d'un sol lorsque celui-ci est soumis à une pression verticale.

$$\tau_{max} = (c + \sigma \tan \varphi) \quad \text{Eq. 57}$$

Pour une contrainte quelconque σ , il est possible de déterminer la résistance au cisaillement correspondante τ_{max} . La grandeur c caractérise la cohésion du sol et φ l'angle de frottement interne. Ces paramètres définissent la droite de Mohr-Colomb, appelée aussi droite de rupture (fig. 20).

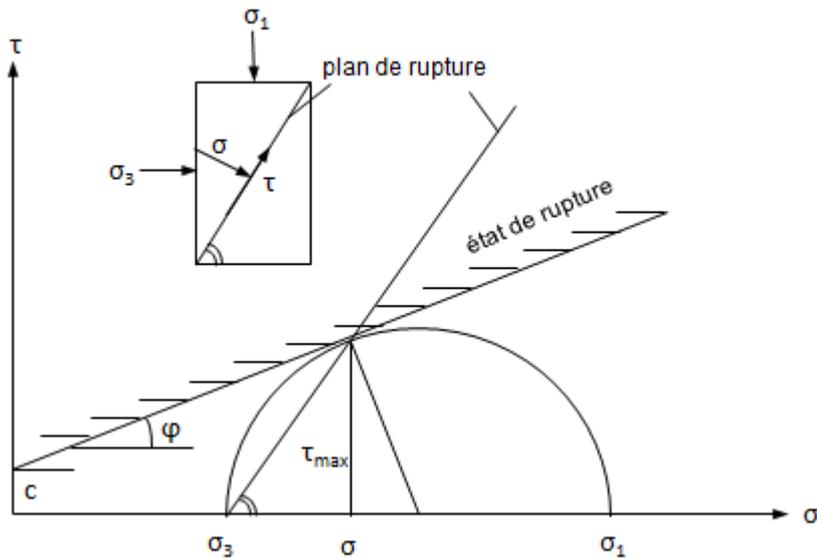


Fig. 20 : représentation générale de la droite et du cercle de Mohr-Coulomb. Etat de rupture pour un sol cohésif [14].

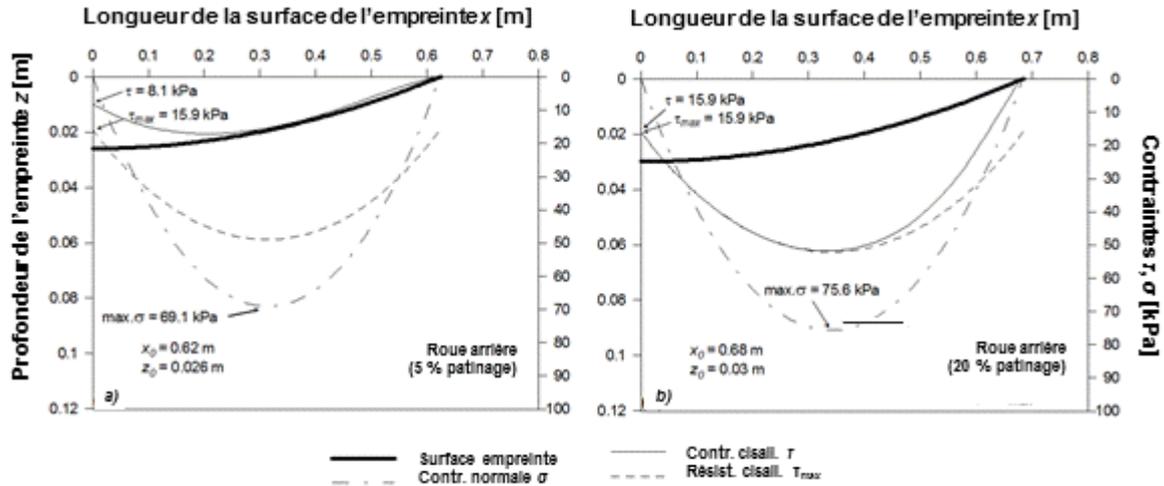


Fig. 21 : interface sol-pneumatique (axes x et z) avec contrainte normale, contrainte de cisaillement et résistance au cisaillement. Sol : silt limoneux. Tracteur : 65 kW, 40.8 kN, pneumatique avant : 380/85R24, arrière : 420/85R34, pression de gonflage avant et arrière 0.6 bar – a) 5 % patinage ; b) 20 % patinage [44].

La surface de l’empreinte sur les axes x et z (fig. 14), la répartition de la contrainte de cisaillement τ (éq. 20), la résistance au cisaillement τ_{max} (éq. 57) et la contrainte normale σ (éq. 21) ont été simulées pour la roue arrière d’un tracteur de 65 kW avec un patinage de 5 % et de 20 % (fig. 21a-b). La contrainte normale maximale atteint 75,6 kPa à proximité du centre de la roue avec un patinage de 20 % (fig. 21b), contre 69,1 kPa avec un patinage de 5 % (fig. 21a). La surface de l’empreinte s’étend en longueur et en profondeur avec le patinage.

La contrainte de cisaillement est trois fois supérieure avec 20 % qu’elle ne l’est avec 5 % de patinage en raison des contraintes normales σ et du déplacement j plus élevés (éq. 20). A 5 % de patinage, la contrainte τ reste inférieure à la résistance au cisaillement ; le sol n’atteint pas l’état de rupture sur l’ensemble de l’empreinte. A 20 % de patinage, en revanche, la contrainte τ atteint, près du centre de la roue, le seuil de résistance au cisaillement (fig. 21b). Le ratio τ/τ_{max} est alors de 1. Sur un tiers de la surface, le sol est en état de rupture, le ratio τ/τ_{max} avoisinant 1 [6, 44]. Pour un taux de patinage donné, les équations 20, 57 permettent de calculer ce ratio τ/τ_{max} le long de l’empreinte (éq. 58) :

$$\frac{\tau}{\tau_{max}} = \left(1 - e^{-j/k}\right) \quad \text{Eq. 58}$$

La figure 22 donne le ratio τ/τ_{max} en fonction du patinage. A moins de 5 % de patinage, aucune rupture du sol n’est à signaler (fig. 66a). A plus de 20 % de patinage, le sol cède. Le ratio τ/τ_{max} avoisine 0,99. Pour la roue arrière, le risque apparaît au seuil de 13 % déjà. Pour la roue avant, avec des contraintes normales plus faibles et de ce fait des résistances au cisaillement moins élevées, les dégâts de rupture apparaissent au seuil de 11 % déjà. (fig. 22).

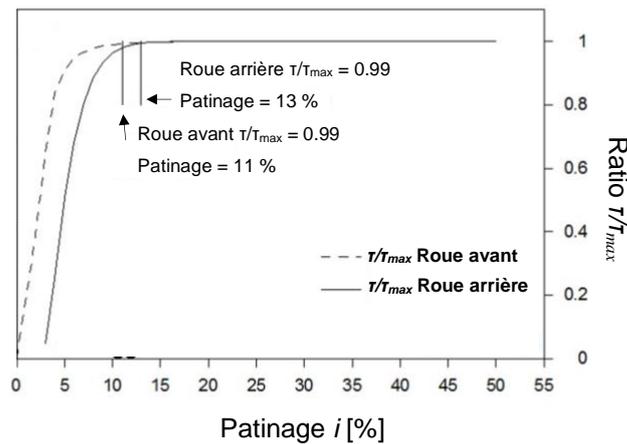


Fig. 22 : ratio τ/τ_{max} en fonction du patinage avec seuil de rupture (ratio ≥ 0.99). Sol : silt limoneux. Tracteur : 65 kW, 40.8 kN, pneumatique avant : 380/85R24, arriere : 420/85R34, pression de gonflage avant et arriere 0.6 bar [44].

4.2 Caractéristiques du sol – tests au champ

La susceptibilité d'un sol à se déformer sous l'effet des roues motrices dépend à la fois des propriétés mécaniques du sol, des propriétés des pneumatiques et de la géométrie du véhicule de traction. Parmi les propriétés du sol, les six paramètres suivants sont nécessaires pour évaluer le seuil de cisaillement d'un sol avec TASC :

- Le module de cohésion K_c
- Le module de friction à la déformation K_φ (ou module de friction)
- L'exposant n (éq. 4)
- La cohésion du sol c (éq. 57)
- L'angle de frottement interne φ (ou de friction interne) (éq. 57)
- Le module de cisaillement k (éq. 20).

Sur le terrain, ces paramètres sont mesurés avec un bévamètre [44]. Un piston pénètre le sol pour déterminer la courbe de compressibilité. La contrainte et le parcours de pénétration sont mesurés. La courbe de compressibilité, réalisée avec des assiettes circulaires de tailles différentes permet de déduire le module de cohésion K_c , le module de friction K_φ et l'exposant n [45]. Le sol est cisailé avec un dispositif circulaire d'ailettes supportant différentes charges [44]. Les contraintes normales et les forces de cisaillement maximales sont enregistrées pour établir le diagramme de Mohr-Coulomb ; la cohésion du sol c et l'angle de frottement interne φ peuvent être déduits de ce diagramme (fig. 20). Outre le bévamètre, la cohésion du sol c peut également être déterminée sur le terrain à l'aide d'un scissomètre [26]. Pour déterminer le module de cisaillement k , on mesure la résistance maximale au cisaillement et le trajet de rotation correspondant (fig. 15). Le module de cisaillement k s'obtient en faisant la moyenne des mesures de résistance au cisaillement, réalisées à chaque fois avec des contraintes différentes.

En laboratoire, des courbes de compressibilité sont établies à l'aide d'un oedomètre [14]. Les paramètres de cisaillement (cohésion du sol c , angle de frottement interne φ) sont obtenus par l'essai de cisaillement triaxial. Un échantillon de sol cylindrique est placé dans le dispositif de cisaillement. Sous une contrainte latérale constante σ_3 , une contrainte axiale croissante σ_1 est exercée jusqu'à rupture du sol. Pour déterminer la cohésion c et l'angle de frottement interne φ des sols cohésifs, il est nécessaire d'effectuer au moins deux essais en appliquant des contraintes normales σ différentes. Le

module de cisaillement k se calcule au moyen d'un simple appareil de cisaillement. Une contrainte normale comprime l'échantillon de sol qui se rompt lentement sous l'effet d'une contrainte tangentielle croissante [56].

Que ce soit sur le terrain avec le bévamètre ou en laboratoire avec les appareils de mesure, les relevés sont laborieux. Afin de mesurer ces paramètres rapidement et simplement au moment même de l'intervention des machines sur le terrain, quatre tests sont proposés.

4.2.1 Profondeur de l'ornièrè

Le module de cohésion K_c , le module de friction K_ϕ à la déformation et l'exposant n peuvent être calculés à partir de la profondeur de l'ornièrè. Avec une petite assiette circulaire du bévamètre, les surfaces de contact des pneumatiques avant et arrière sont prises en considération. Le module de cohésion K_c à la déformation perd de son importance lorsque la surface de pression est de grande taille. La pression peut finalement être déduite du module de friction K_ϕ (également appelé module d'élasticité K), de la profondeur z et de l'exposant n (éq. 59) :

$$p_s = \left(\frac{K_c}{b} + K_\phi \right) z^n = K \cdot z^n \quad \text{Eqs. 4, 59}$$

La charge à la roue s'équilibre par rapport aux résultantes de la pression qui s'exercent au niveau de l'interface sol-pneumatique (éq. 5). Si l'on distingue les crampons de l'espace séparant les crampons, on obtient l'équation 60, respectivement l'équation 61 pour la charge à la roue avant et arrière :

$$W_v = [K \cdot z_{sv}^n \cdot A_v \cdot \mu] + [K \cdot (z_{sv} - h_{sv})^n \cdot A_v \cdot (1 - \mu)] \quad \text{Eq. 60}$$

$$W_h = [K \cdot z_{sh}^n \cdot A_h \cdot \mu] + [K \cdot (z_{sh} - h_{sh})^n \cdot A_h \cdot (1 - \mu)] \quad \text{Eq. 61}$$

avec $W_{v,h}$ pour la charge à la roue avant, respectivement arrière, $z_{sv,sh}$ pour la profondeur de l'ornièrè avant, respectivement arrière, $h_{sv,sh}$ pour la hauteur des crampons avant, respectivement arrière (centre de la bande de roulement) (fig. 23b), $A_{v,h}$ pour la surface de l'empreinte avant, respectivement arrière, K et n pour les paramètres du sol, qui se calculent selon le système d'équations (éq. 60, 61), μ pour le ratio entre la surface de l'empreinte des crampons et la surface de toute la bande de roulement du pneumatique (éq. 62) :

$$\mu = \frac{A_s \cdot n_s}{\pi \cdot D \cdot b} \quad \text{Eq. 62}$$

avec A_s pour la surface de l'empreinte d'un crampon, n_s pour le nombre de crampons sur la bande de roulement, D pour le diamètre de la roue et b pour la largeur de la roue. Les résultats de mesure ont montré que μ variait entre 0,24 et 0,28 suivant le profil du pneumatique et son degré d'usure. Pour les calculs de simulation, une valeur de 0,26 est retenue. Les surfaces d'empreinte $A_{v,h}$ se réfèrent aux équations des pneumatiques moteurs figurant à la feuille „Comments“ de l'application TASC. La hauteur des crampons de la majorité des pneumatiques figure dans le répertoire ou banque de données des pneumatiques moteurs.

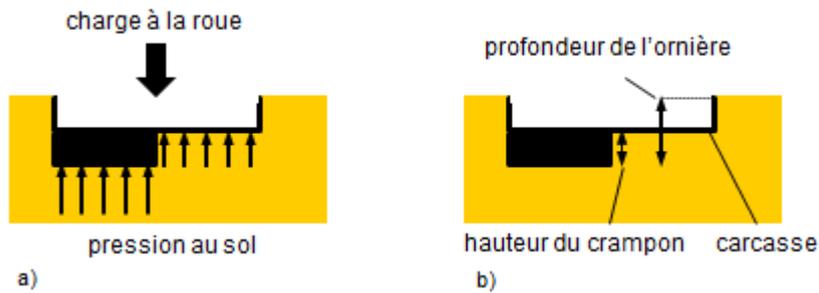


Fig. 23 : a) équilibre entre le poids de la roue et la résultante des pressions au sol ; b) profil de l'ornière.

Les équations 60 et 61 s'appliquent aussi aux roues jumelées. La surface de l'empreinte et la charge à la roue sont additionnées pour les roues avant et arrière. Si aucun prélèvement de la hauteur des crampons comme de l'ornière n'est effectué, le modèle effectue un calcul standard avec des valeurs par défaut (tab. 11).

Tableau 11 : exposant n lié à l'enfoncement dans le sol et module d'élasticité à la compression K pour chaque classe de consistance du sol (sélection standard - test au tournevis)

Classes de consistance du sol	Exposant n	Module d'élasticité K [kN /m ⁿ⁺²]
tendre	0.70	1500
semi-dure	0.85	5500
dure	1.00	25000

 **Important** : pour mesurer la profondeur de l'ornière, la roue arrière ne doit pas circuler dans la voie de la roue avant. La profondeur de l'ornière doit être équilibrée à la charge à la roue arrière/avant pour le calcul des paramètres K et n . La solution consiste à rouler sur terrain vierge en marche avant pour la mesure des roues avant et en marche arrière pour la mesure des roues arrière.

 **Attention** : lorsque la simulation se base sur des estimations et non sur des mesures pour la profondeur de l'ornière et la hauteur des crampons, veuillez alors choisir des valeurs plausibles en tenant compte de la pression de contact. Sur les sols rassis, la profondeur de l'ornière est généralement inférieure à 6 cm.

4.2.2 Test de la houe

La cohésion c du sol est déterminée à l'aide du test de la houe (piochard), un test important pour estimer la puissance de traction d'un tracteur compte tenu des propriétés du sol. La texture du sol, son humidité, l'enracinement de la végétation influencent la cohésion du sol.

La force nécessaire pour cisailer le sol est estimée à l'aide du test à la houe, ceci en fonction de la position du corps (tab. 12, fig. 24a-d). La longueur du manche et la dimension de la lame restent fixes (tabl. 13).

Tableau 12 : force requise F et position du corps correspondante pour cisailer le sol avec la houe

Position du corps	Force F [kgf]
une main au manche	18
deux mains au manche	26
une main au manche avec jambes pliées	34
deux mains au manche avec jambes pliées	46
apparemment pas possible	55

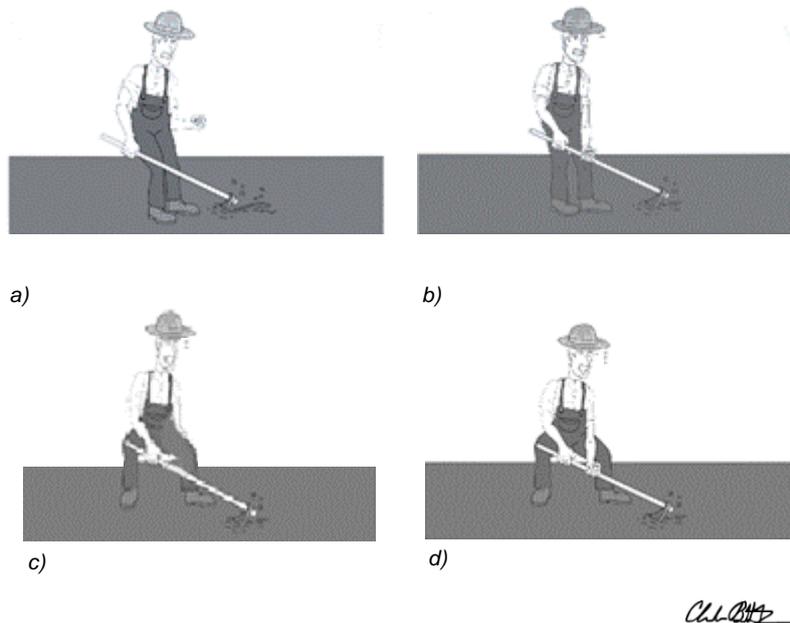


Fig. 24 : les quatre positions du corps liées au test de la houe (piochard) : a) une main au manche; b) deux mains au manche; c) une main au manche, jambes pliées; d) deux mains au manche, jambes pliées.

La houe est enfoncée dans le sol de sorte que l'outil y reste planté de lui-même après la frappe. Le cas n'est pas pris en compte ici lorsque la houe ne peut être enfoncée, le sol étant trop dur. Ce cas ne présente que peu d'intérêt car sans danger pour le sol.

On relèvera également la hauteur du manche à son extrémité g et la profondeur de pénétration L distance dans le sol parallèlement à la direction de la lame (fig. 27). Les dimensions de la houe comprenant la longueur du manche s , la hauteur de la lame f , la largeur de la lame b , l'angle formé par la houe et le manche λ sont fixes (tab. 13, figs. 25, 27).

Tableau 13 : Test à la houe, dimensions standard

Dimensions	
Manche s [cm]	140
Hauteur de la lame f [cm]	20
Largeur de la lame b [cm]	14
Angle λ formé par le manche et la lame [°]	80



Fig. 25 : la houe (piochard) servant au test – Distributeurs : No art. 10480 Landi CH / Marque ABA Krapf, commerce en détail, CH.

Le calcul de la cohésion du sol c à l'aide du test à la houe relève du mécanisme de rupture bidimensionnelle de Reece [57] (fig. 26) et sur l'existence d'un équilibre entre la force F exercée sur le manche et la force résultante de cisaillement P exercée par la lame (fig. 27). Ce calcul repose sur deux hypothèses :

- La part de la contrainte liée à la cohésion c est bien plus élevée que celle liée au propre poids du sol ($\tau - c$).
- La ligne de rupture du sol et la ligne de rupture du sol avec la houe coupent l'abscisse au même point O' de la droite de Mohr-Coulomb (fig. 26).

La droite de Mohr-Coulomb (fig. 26) permet les équations suivantes (éq. 63) selon [58] :

$$\psi = c \cot \varphi = c_a \cot \delta \quad \text{Eq. 63}$$

avec

ψ = distance entre O' et le point d'intersection de l'axe des abscisses et de l'axe des ordonnées

c = cohésion du sol

c_a = frottement entre la lame et le sol

φ = angle de frottement interne

δ = angle du frottement interne entre la lame et le sol.

La relation suivante (éq. 64) donne la force de cisaillement P (fig. 71, 72) :

$$P = c N_c b L s \sin \alpha \quad \text{Eq. 64}$$

avec

b = largeur de la houe

L = profondeur de pénétration (parallèlement à la direction de la lame)

α = angle formé par la surface du sol et la lame dans le sol

N_c = facteur indépendant de la géométrie de la houe, de la résistance interne du sol au frottement et de la résistance au frottement entre le sol et la lame (éq. 65) :

$$N_c = \left(\frac{\cot g \varphi}{\cos \delta \sin d\alpha} \right) \left[\left(\frac{1 + \sin \varphi \cos 2\varepsilon}{1 - \sin \varphi} \right) e^{2\theta g \varphi} - 1 \right] \quad \text{Eq. 65}$$

avec l'angle ε (éq. 66) :

$$\varepsilon = \frac{1}{2} \left[\delta + \frac{1}{\sin \left(\frac{\sin \delta}{\sin \varphi} \right)} \right] \quad \text{Eq. 66}$$

et l'angle θ (éq. 67) :

$$\theta = \alpha + \varepsilon - \frac{\pi}{2} \quad \text{Eq. 67}$$

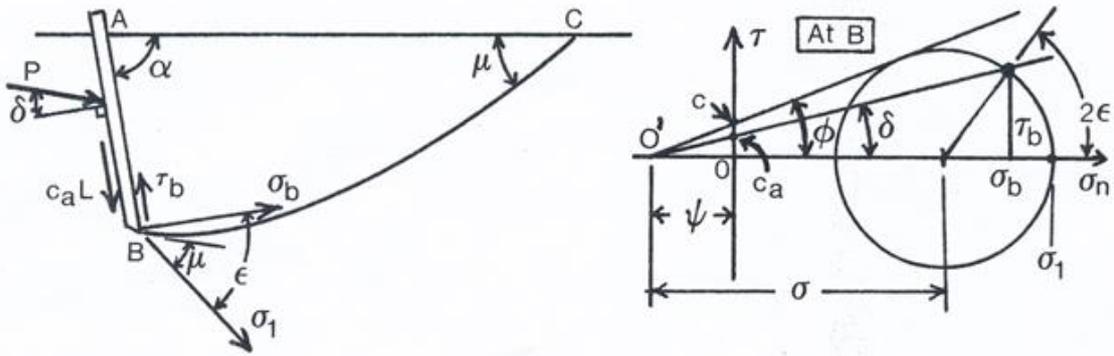


Fig. 26 : conditions de rupture du sol avec la houe. Droite de Mohr-Coulomb [58].

A partir de l'équilibre entre la force de traction F et la résistance au cisaillement P (fig. 15) [58], on obtient pour F (éq. 68) :

$$F = \frac{P - C \sin \delta}{\sin(\lambda - \delta)} \quad \text{Eq. 68}$$

$\lambda = 80^\circ$ (tab. 14, fig. 27) et pour C (éq. 69) :

$$C = c_a L b \quad \text{Eq. 69}$$

Les équations 63 à 69 ci-dessus permettent de calculer la cohésion du sol c (éq. 70) :

$$c = \frac{F \sin(\lambda - \delta)}{Lb \left(N_c \sin \alpha - \frac{tg\delta}{tg\phi} \sin \delta \right)} \quad \text{Eq.70}$$

On admet que l'angle de frottement interne entre le sol et la lame δ est égal au 2/3 de l'angle de frottement interne ϕ [58]. L'angle ϕ est défini par la texture du sol (§ 4.2.3). La relation entre la hauteur de la poignée g (valeur donnée) et l'angle α est définie comme suit (éq. 71) (fig. 27) :

$$g = (f - L) \sin \alpha + s \sin(\lambda - \alpha) \quad \text{Eq. 71}$$

Comme il n'existe pas de solution implicite pour α , la simulation choisit la solution la plus proche avec une valeur g donnée.

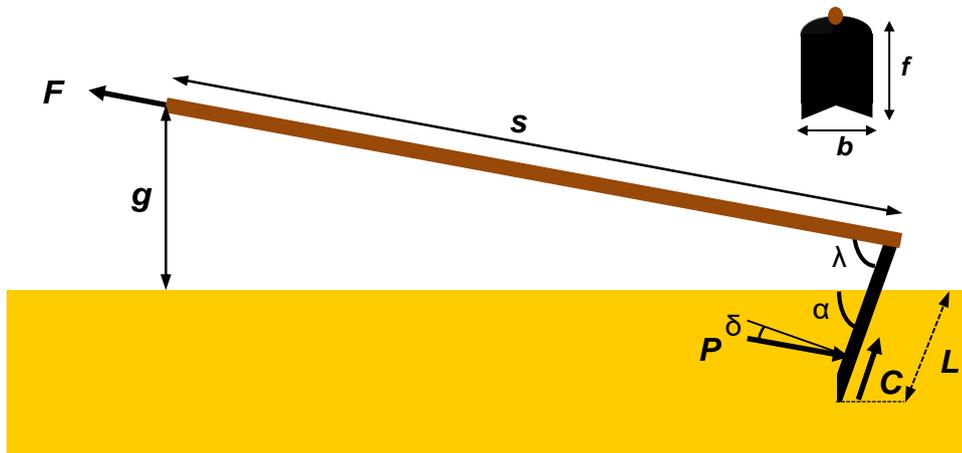


Fig. 27 : forces agissant sur la houe.

Si l'on renonce au test de la houe, alors sélectionner « sans le test à la houe » dans la feuille « Traction analysis input ». La simulation prend alors en compte les valeurs prédéfinies du test du tournevis (tab. 14 § 4.2.5) et de la texture (tab.15 § 4.2.3). En mode « sans test de la houe », la profondeur de l'ornière et la hauteur des crampons ne sont ni nécessaires, ni prises en compte. Les valeurs par défaut de l'exposant n et du module de déformation K interviennent alors pour le calcul (tab. 11).

Tableau 14 : Valeurs prédéfinies du test à la houe pour les trois classes de consistance du sol

Classes de consistance du sol	Hauteur du manche g [cm]	Profondeur de pénétration L^* [cm]	Force requise F [kgf]	Cohésion du sol [kPa]
tendre	80	8	18 (une main)	8.51
demi-dure	80	8	34 (une main, jambes pliées)	16.07
dure	80	8	55 (apparemment pas possible)	25.99

* parallèle à l'orientation de la lame



Attention : sachant que la cohésion dépend de différents facteurs comme la texture, l'humidité du sol, la formation d'agrégats, les résidus végétaux et l'enracinement, ce test est très important. Les résultats du test ne sont fiables que lorsqu'il est effectué sur une surface foulée, rappuyée, sans patinage.

4.2.3 Test tactile

L'angle de frottement interne φ est directement lié à la texture du sol. Le test tactile (tab. 4, § 3.2.2) permet donc d'intégrer ce paramètre dans la simulation. Comme pour la sensibilité du sol à la compaction, le paramètre φ est divisé en cinq classes de texture (tab.15).

Tableau 15 : valeurs standards de l'angle de friction interne pour chaque classe de texture

Texture du sol	Angle de friction interne φ [°]
sols argileux > 40 % argile, < 50 % silt	14
sols silteux > 50 % silt	22
limon argileux, sols limoneux 20–40 % argile, < 50 % silt	25
limon sableux et sables limoneux 10–20 % argile, < 50 % silt	30
sols sableux 0–10 % argile, < 50 % silt	23

Ce paramètre est important pour définir les résistances au cisaillement de l'interface sol-pneumatique τ ainsi que les contraintes maximales de cisaillement τ_{max} compte de tenu des contraintes normales σ .

Plus l'angle φ est important, plus la contrainte verticale σ va influencer sur la résistance au cisaillement τ (éq. 57, fig. 20).

4.2.4 Test du tournevis

Le module de cisaillement k est évalué à l'aide du test du tournevis (fig. 9) comme c'est le cas pour la consistance du sol (§ 3.2.4).

Les mesures réalisées sur différents sols, de textures variées ont montré une corrélation linéaire entre la résistance à la pénétration du tournevis PR et le module de cisaillement k (fig. 28).

Les valeurs du module de cisaillement k 0,0068 m, 0,0093 m et 0,0108 m correspondent respectivement aux trois classes de dureté dure, mi-dure et tendre (tab. 16).

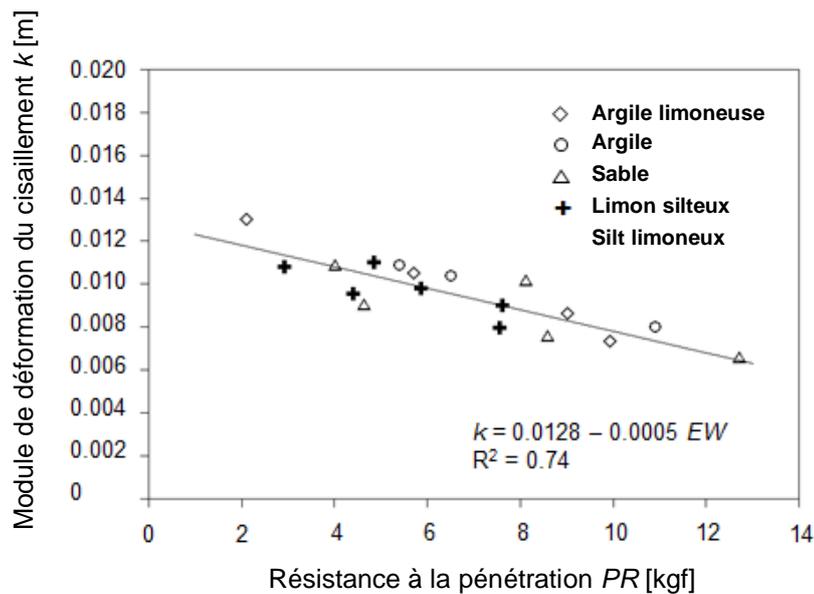


Fig. 28 : Régression donnant le module de déformation du cisaillement k en fonction de la résistance à la pénétration PR pour des sols de granulométrie différente.

Tableau 16 : valeurs standards de la résistance à la pénétration PR et du module de cisaillement k correspondant au test du tournevis

Classes de consistance du sol	Domaine [kgf]	Résistance à la pénétration PR [kgf]	Module de cisaillement k [m]
tendre	0 – 4,9	4,0	0.0108
mi-dure	≥ 5 – 7,9	7,0	0.0093
dure	≥ 8	12,0	0.0068



Important : comme le module de cisaillement k dépend directement de la consistance du sol PR , y prendre garde. Les valeurs mesurées sur d'anciennes voies de passage sont plus élevées que les valeurs mesurées dans les plages non foulées.



Important : effectuer les tests sur le terrain pour évaluer fiablement la vulnérabilité du sol et ainsi le protéger.

4.3 Caractéristiques du tracteur

4.3.1 Largeur et diamètre des pneumatiques, circonférence de roulement

La largeur du pneumatique est un paramètre important pour les calculs allant de la surface de l'empreinte (éq. 13), des composantes verticale et tangentielle des forces agissant sur l'interface (éq. 20-22) à la force totale à la roue (éq. 35) à la résistance du sol (éq. 36-37) puis à la force de traction nette (éq. 38). La circonférence de roulement sous charge est déterminante pour obtenir le rayon sous charge R_r et le taux de patinage i (éq. 30). Un facteur de 0.95 est associé à la circonférence de la roue pour en déduire la valeur correspondante sous charge (éq. 72) :

$$U_r = D \cdot \pi \cdot 0.95 \quad \text{Eq. 72}$$

Avec U_r pour la circonférence de roulement sous charge (données techniques des fabricants de pneumatiques [10]) et D pour le diamètre du pneumatique sans charge. Le diamètre D et le rayon sans charge $R = D/2$ interviennent simultanément dans le calcul de l'empreinte (éq. 9-12) et du patinage (éq. 29).

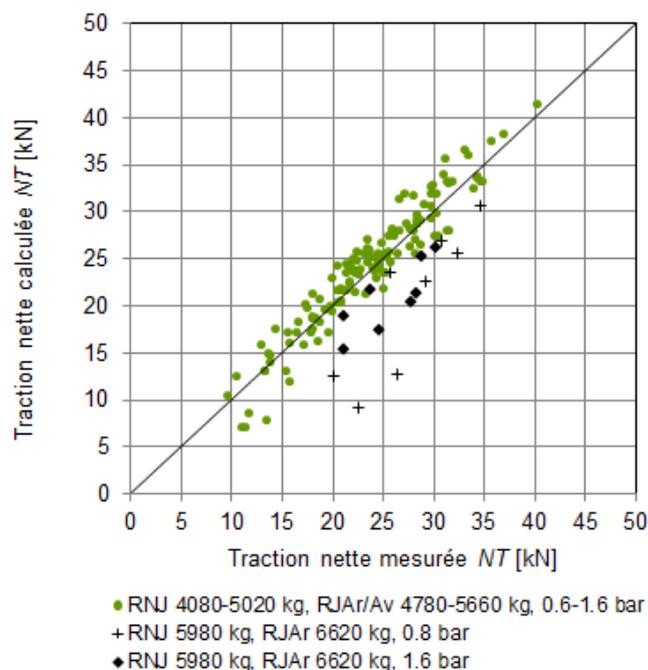


Fig. 29 : valeurs calculées opposées aux valeurs mesurées de la traction nette avec le tracteur de référence 65 kW (poids à vide 4080 kg). Les importants écarts à la ligne 1:1 proviennent de charges excessives avec des pressions de gonflage trop faibles. RNJ : roues non jumelées, RJA/R : avec roues jumelées à l'arrière respectivement à l'avant.



Attention : avec une charge à la roue trop élevée et une pression de gonflage trop faible, le pneumatique se déforme considérablement. Le facteur 0,95 est alors trop élevé. Le patinage calculé est alors surestimé alors que la force de traction, elle, est sous-évaluée (fig. 29).



Conseils : pour parer à cette imprécision, il est alors recommandé lorsque la courbe donnant la force traction en fonction du patinage a) coupe l'axe des abscisses X (patinage), de réduire manuellement la circonférence de roulement, b) coupe l'axe des ordonnées Y (force de

traction), de réhausser manuellement la circonférence de roulement. Ces modifications n'ont aucune influence notable en dessous du seuil de 10 % de patinage.

4.3.2 Pression de gonflage, diamètre des jantes

La rigidité des pneumatiques K_t [kN/m] est un paramètre supplémentaire pour calculer la surface de l'empreinte. Lines et Murphy [46] admettent que le pneumatique est un corps élastique avec une déformation linéaire lorsque la pression de gonflage varie (éqs. 73-75). Le diamètre de la jante joue également un rôle majeur :

$$K_t = K_{carc} + \Delta K_p P_i \quad \text{Eq. 73}$$

$$K_{carc} = 172 - 69.69 D_{rim} + 5.6Y \quad \text{Eq. 74}$$

$$\Delta K_p = 5.27 \cdot D_{rim} \cdot b \quad \text{Eq. 75}$$

avec K_{carc} pour la rigidité de la carcasse [kN/m], ΔK_p pour la rigidité du pneumatique en fonction de la pression de gonflage [kN/m], P_i pour la pression de gonflage [kPa], D_{rim} pour le diamètre de la jante [m], b pour la largeur du pneumatique [m] et Y pour l'âge [an], sachant que ce dernier est une grandeur plutôt négligeable. La rigidité du pneumatique intervient en début de calcul dans l'évaluation de la surface de l'empreinte (éq. 9).

Pour les roues jumelées, la rigidité des différents pneumatiques est additionnée. La charge est ensuite répartie sur ces deux pneumatiques proportionnellement à leur rigidité respective. Imaginer deux ressorts (cas de deux roues) sur lesquels on dépose une seule charge.

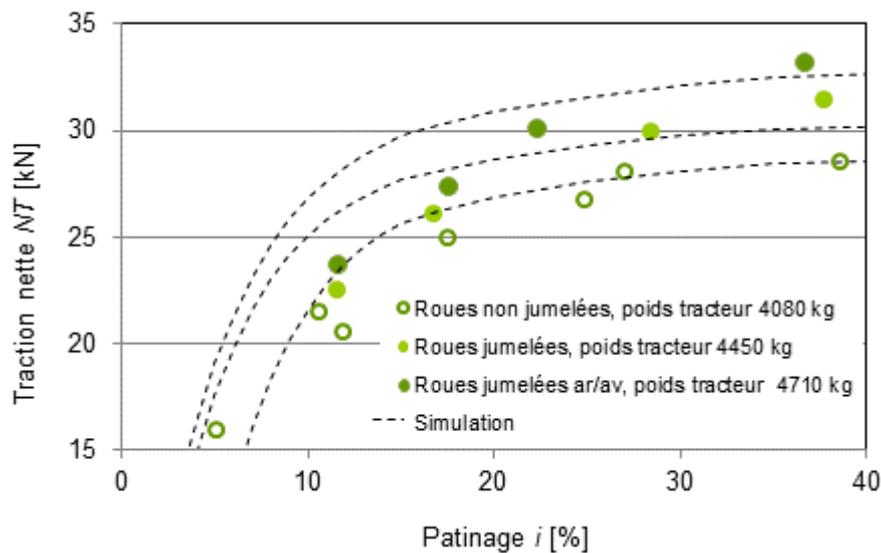


Fig. 30 : courbe de traction-patinage avec un tracteur de 65 kW – valeurs calculées opposées aux valeurs mesurées avec et sans roues jumelées sur un silt. Pression de gonflage 0.6 bar.



Attention : pour obtenir tout l'effet des roues jumelées, la charge totale ou la pression de contact doit être répartie de manière la plus homogène possible sur l'interface. Les diamètres extérieurs des pneumatiques doivent être autant que possible égaux. Certes la roue extérieure doit être moins sollicitée pour éviter un trop grand porte-à-faux sur l'axe, mais pas à l'excès ; la perte en force de traction dans la plage optimale de patinage optimale entre 10 et 15 % serait trop grande (fig. 30).

4.3.3 Charge à la roue

Dans le tableau de saisie « Traction analysis input », c'est la charge à la roue stationnaire qui est requise. La charge, variant avec l'effort de traction (éqs. 55, 56) est recalculée ensuite pour chaque degré de patinage (fig. 13).

En présence de roues jumelées, la charge totale est à introduire une seule fois dans le tableau de saisie à la ligne correspondant à la roue principale. Les deux pneumatiques se fondent en un seul plus large mais de rigidité différente de part et d'autre, sur les côtés.

4.3.4 Empattement et hauteur de l'attelage

L'empattement et la hauteur de l'attelage sont à introduire manuellement dans le tableau de saisie. Au même titre que le couple généré par chaque roue motrice, ces deux paramètres influent sur la variation de charge des essieux lors d'un effort de traction (éqs. 55, 56). Plus la hauteur d'attelage est élevée, plus l'empattement est faible, plus grande sera la charge transférée de l'essieu avant vers l'essieu arrière.

Pour déterminer la hauteur h des outils attelés aux trois points, le point de fixation des bras inférieurs sur le châssis du tracteur est essentiel, lorsque la force de traction est transmise essentiellement par les deux bras inférieurs parallèlement à la surface du sol (fig. 31). Le vecteur de force de traction doit rester le plus horizontal possible. Si le bras supérieur prend en charge une partie de la force de traction, la hauteur de référence se décale d'autant vers le haut (sous-soleuse, chisel). Pour les outils attelés avec un amplificateur de traction, le vecteur de force de traction est incliné. Une part du poids de l'outil s'ajoute alors sur l'essieu arrière du véhicule augmentant sa traction tout en diminuant le patinage.

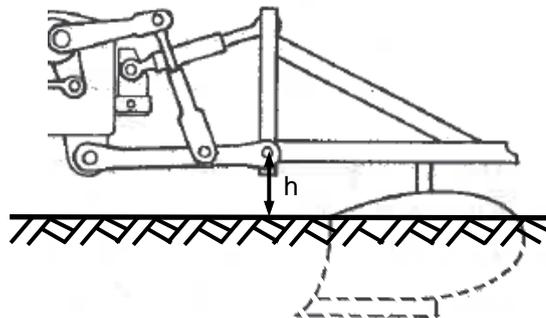


Fig. 31 : attelage d'un outil aux trois points du tracteur. Hauteur h séparant la surface du sol des bras inférieurs d'attelage parallèles au sol.

4.4 Validation

Le moteur de calcul implémenté des propriétés mécaniques du sol issues du bévamètre (§ 4.2) et de celles du tracteur (§ 4.3) génère différents éléments dont la courbe de traction-patinage, les besoins en énergie, en carburant ainsi que les seuils de cisaillement. Indépendamment des calculs, les empreintes, la force de traction, le patinage, la consommation de carburant et les déplacements du sol par cisaillement ont été mesurés in situ sur plusieurs parcelles [44]. Une comparaison des valeurs calculées avec celles mesurées est dès lors possible.

4.4.1 Surface de l'empreinte

Pour la surface de l'empreinte, la comparaison relève de mesures antérieures effectuées par la méthode d'analyse d'images (§ 4.3.5) sur un sol d'argile limoneux. La surface de l'empreinte calculée d'après l'équation 13 avec comme longueur maximale $x = x_0$ (fig. 21) et la largeur b .

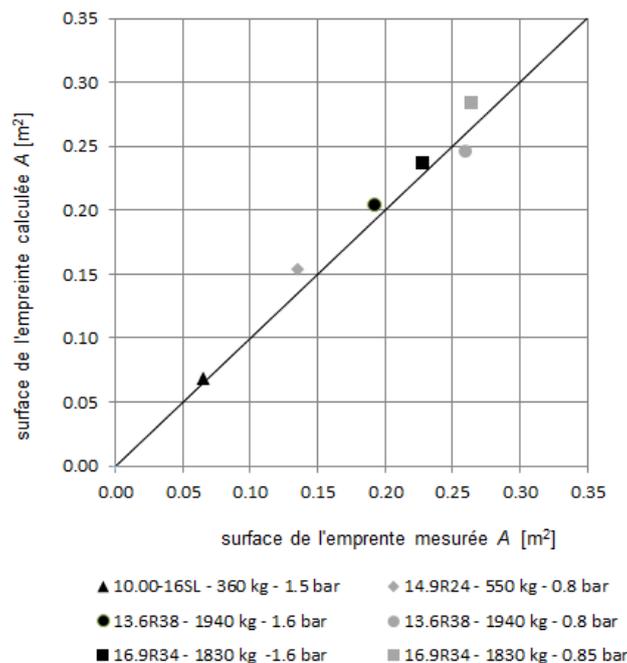


Fig. 32 : calcul de la surface de l'empreinte. Valeurs calculées opposées aux valeurs mesurées pour un sol d'argile limoneux.

Une concordance élevée est observée entre les valeurs mesurées et les valeurs calculées pour des pneumatiques de dimensions, de charges à la roue et de pressions de gonflage variables (fig. 32).

4.4.2. Courbe de traction-patinage

Pour les mesures de traction et de patinage, deux tracteurs (l'un de traction à l'avant, l'autre de freinage à l'arrière) reliés tous deux par un câble ont été engagés sur différentes parcelles. Une cellule de traction est insérée au câble ; la vitesse angulaire est obtenue au moyen d'un capteur de traction fixé sur l'une des jantes arrière alors que la vitesse réelle du véhicule, elle, est enregistrée avec un radar [44].

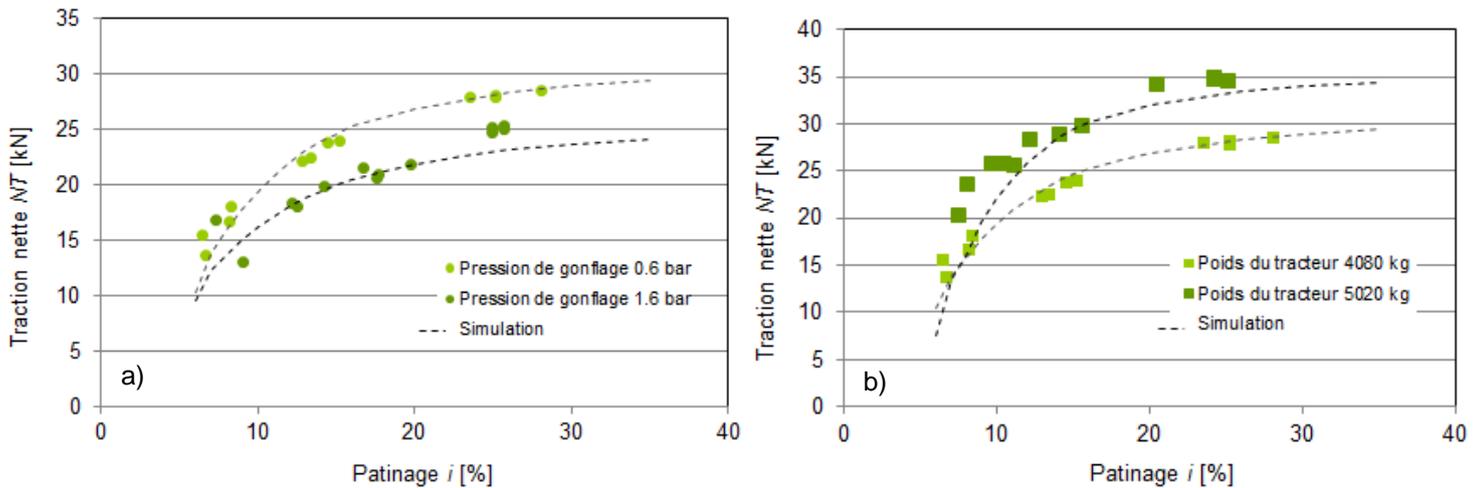


Fig. 33 : valeurs calculées opposées aux valeurs mesurées de la force de traction en fonction du patinage. Tracteur 65 kW, sol d'argile limoneuse : a) roues non jumelées RNJ : 4080 kg 0.6 bar av/ar - 1.6 bar av/ar ; b) RNJ : 4080 kg/5020 kg - 0.6 bar av/ar.

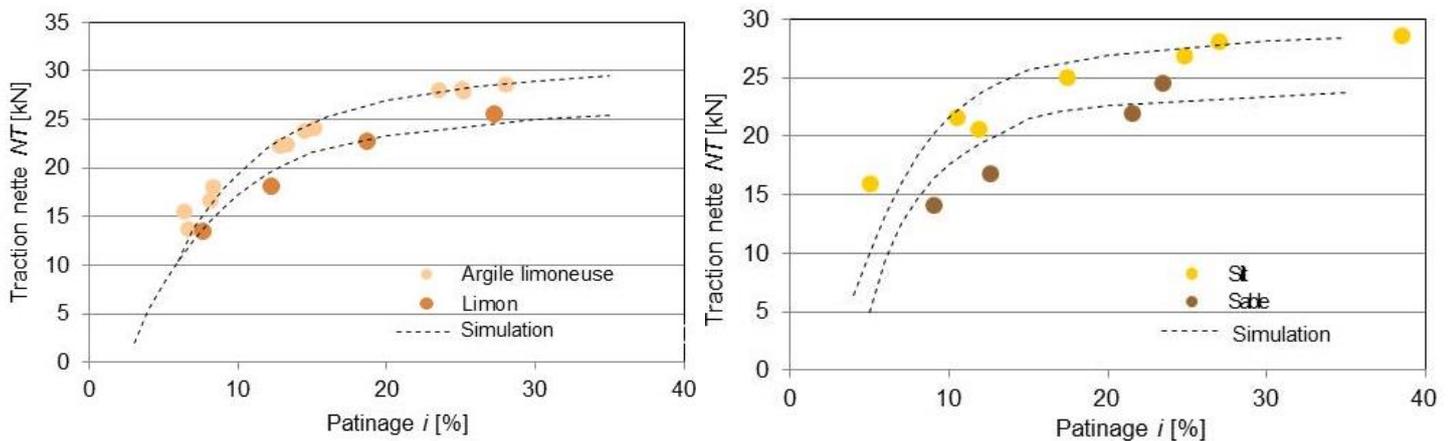


Fig. 34 : valeurs calculées opposées aux valeurs mesurées de la force de traction en fonction du patinage. Tracteur 65 kW, RNJ : 4080 kg 0.6 bar : a) argile limoneuse et limon ; b) silt et sable.

La concordance entre valeurs calculées et mesurées se laisse vérifier lorsque la pression de gonflage (fig. 33a), la charge (fig. 33b) ou la granulométrie du sol (fig. 34a-b) varie. Des différences cependant apparaissent : sous pression de gonflage élevée, la traction calculée est légèrement sous-estimée. Le couvert végétal hétérogène avec présence de chaume limite les déformations du sol, favorise la traction (fig. 33a). A charge élevée et faible pression de gonflage, la déformation du pneumatique est

importante. Le rayon sous charge calculé surestimé donne alors des valeurs de patinage excessives (fig. 33b). Sur sable, les valeurs calculées sont supérieures aux valeurs mesurées lorsque le patinage ne dépasse pas 20 % (fig. 34b). Dans ce cas, des imprécisions dans l'acquisition de données de la vitesse angulaire ne peuvent être exclues.

En regroupant les données de tous les tracteurs en mode roues non jumelées (RNJ), les points se rassemblent près de la ligne 1:1 (fig. 35a). Les données s'en écartent sensiblement lorsque la puissance du tracteur augmente. Si l'on compare les données du tracteur de référence (65 kW) dans le mode RNJ (fig. 35a) avec les données du même tracteur dans tous les modes (RNJ, RJAr, RJAr+Av, fig. 80b), les divergences augmentent à peine. La pente des deux droites de régression reste proche de 1 avec un coefficient de détermination R^2 supérieur à 0.9 Ce modèle de calcul convient donc pour une large gamme de pressions de gonflage, de charges, de pneumatiques, de tracteurs, de sols.

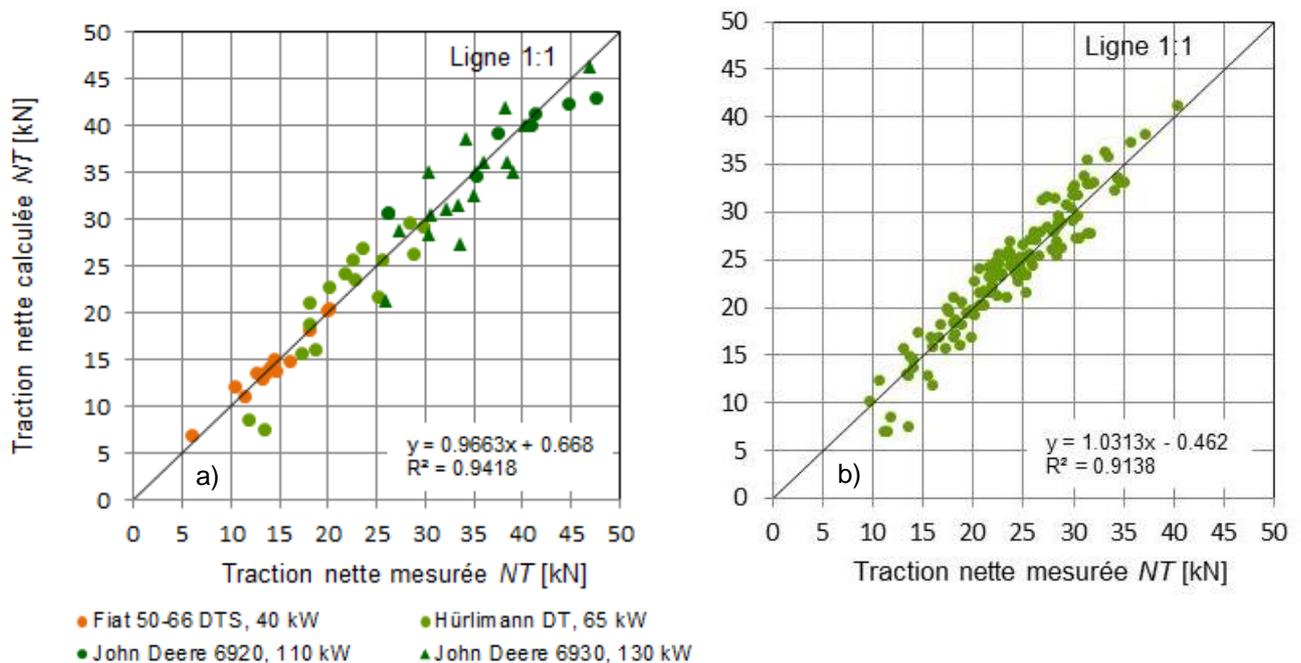


Fig. 35 : valeurs calculées opposées aux valeurs mesurées de la force de traction : a) tracteurs 40–110 kW sur limon (130 kW sur sable) avec roues non jumelées (RNJ); b) tracteur de référence 65 kW RNJ / RJAr / RJAr+Av tous les sites.

Si l'on compare les moyennes des forces de traction mesurées et des forces de traction calculées pour le tracteur de référence (28 cas / 28 courbes de traction-patinage, 65 kW), dans 7 % des cas, l'erreur moyenne dépasse les 20 %, dans 25 % des cas les 10 % et dans 68 % des cas l'erreur moyenne est égale ou inférieure à 10 %. Pour les tracteurs de 40 kW, 110 kW, 130 kW (10 cas), l'erreur moyenne ne dépasse que dans 10 % des cas les 10 % [44].

4.4.3. Consommation de carburant

Lors des essais de traction [44], les régimes du moteur retenus ne dépassaient pas les 60 à 80 % des régimes nominaux, générant ainsi à puissance élevée, un couple et une force de traction optimaux avec une consommation spécifique de diesel réduite [51].

Régimes du moteur pour les trois tracteurs engagés : tracteur de 40 kW (Fiat 50-66 DTS) 64 % à 1500 t·min⁻¹, tracteur de 65 kW (Hürlimann H488 DT), 68 % à 1700 t· min⁻¹ et tracteur de 123 kW (John Deere Premium 6930) 79 % à 1500 t·min⁻¹. Ces régimes sont maintenus constant. Lorsque la force de traction augmente, la vitesse diminue.

Charges et pressions de gonflage varient pour chaque tracteur. Pour le tracteur de référence (65 kW), les mesures ont été répétées sur quatre sites avec roues simples et roues jumelées [44].

Les valeurs calculées (éq. 52) de la consommation horaire de diesel sont confrontées aux valeurs mesurées (fig. 36). Une réserve quant aux comparaisons possibles subsiste puisque les valeurs de référence B_{eM} (consommation spécifique liée au moteur, tab. 11) ne sont pas spécifiques aux tracteurs retenus. Par ailleurs, il s'agit de valeurs pondérées privilégiant le régime nominal du moteur, éloignant la consommation de son optimum avec des valeurs plutôt élevées (fig. 36). Malgré ces légères dérives possibles, tous les points restent proches de la ligne 1:1. Il y a concordance.

Le tableau 17 donne pour les trois tracteurs les coefficients de régressions m et b avec les intervalles de confiance (ligne 1:1, $m = 1$ et $b = 0$). Les valeurs mesurées et calculées ont été évaluées statistiquement pour les trois tracteurs (tab. 17). Pour le tracteur de 40 kW, les valeurs peu nombreuses doivent être interprétées avec réserve ; néanmoins, les points sont proches de la ligne 1:1. Dans le tableau 18, les coefficients de la ligne 1:1, $m = 1$ et $b = 0$, se situent dans l'intervalle de confiance des coefficients calculés pour le tracteur de 40 kW. Comme tous les points se situent légèrement au-dessus de la droite, on ne peut exclure une surévaluation de la valeur de référence de ce tracteur (tab. 10).

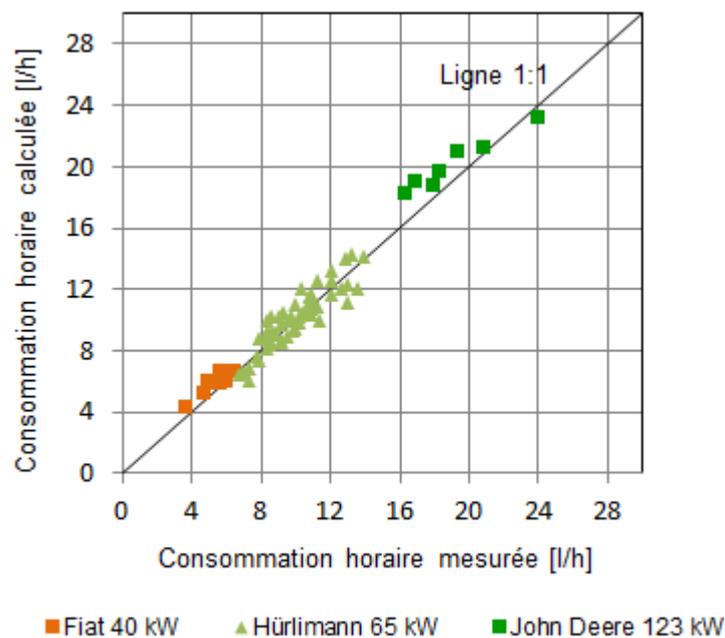


Fig. 36 : consommation horaire de carburant – valeurs calculées opposées aux valeurs mesurées pour trois tracteurs de puissances différentes.

Tableau 17 : Coefficients de régression m , b avec intervalle de confiance à partir de la fonction $y = mx + b$ (y pour la consommation horaire calculée et x pour la consommation horaire mesurée de carburant)

	n	Pente m	Intervalle de conf.		Inhomogénéité b	Intervalle de conf.	
			68 %	95 %		68 %	95 %
FIAT 40 kW	11	0.770	± 0.143	± 0.286	1.725	± 0.784	± 1.568
Hürlimann 65 kW	53	0.972	± 0.063	± 0.126	0.330	± 0.642	± 1.284
John Deere 123 kW	7	0.651	± 0.069	± 0.138	7.809	± 0.132	± 0.264

On dispose d'un plus grand nombre de mesures pour le tracteur de 65 kW. Les points se rassemblent des deux côtés à proximité de la droite avec un coefficient de détermination R^2 de 0,82. Les coefficients de régression $m = 0,972$ et $b = 0,330$, se trouvent également dans l'intervalle de confiance, ne se différenciant pas de ceux de la ligne 1:1. On dispose que de peu de points pour le tracteur de 123 kW. Etant donné la puissance supérieure de ce tracteur, sa consommation de carburant est également plus élevée. Les coefficients de la ligne 1:1 ne se situent plus dans les intervalles de confiance correspondants. Comme pour les deux autres tracteurs, la majorité des écarts entre valeurs moyennes calculées et valeurs moyennes mesurées restent inférieurs à 10 %.

4.4.4. Vulnérabilité du sol en surface et seuil de cisaillement

Le déplacement vers l'arrière des agrégats d'un sol silteux sous chaume de maïs, soumis à différents degrés de patinage sont mesurés [6, 44]. Pour ce faire, avant le passage du tracteur, une bande transversale [1,2 m x 0,06 m] est colorée avec un spray (fig. 19).

La comparaison entre l'évolution du ratio τ / τ_{\max} issu de la simulation et les déplacements de sol mesurés avec un pourcentage de patinage croissant permet de valider l'estimation des risques (fig. 37a-c).

Les seuils de cisaillement sont atteints avec 11 % de patinage pour la roue avant non jumelée, 13 % de patinage pour la roue arrière non jumelée avec 0.6 bar de pression et une force de traction de 33 kN. Le déplacement de sol augmente considérablement dès que le rapport se rapproche de 1 (fig. 37a). Pour les deux roues avant et arrière, le seuil descend à 11 % lorsque la pression de gonflage s'élève à 1.6 bar avec une force de traction inférieure (29 kN). A 12 % de patinage, d'importants déplacements d'agrégats sont observés (fig. 37b). Avec des roues jumelées, une charge supplémentaire et une pression de gonflage de 0,6 bar, cette zone limite s'élève à 13 % de patinage pour les deux roues, correspondant à une force de traction bien supérieure de 39 kN. A partir de 14 % de patinage, on observe un net cisaillement du sol avec déplacements d'agrégats vers l'arrière (fig. 37c).

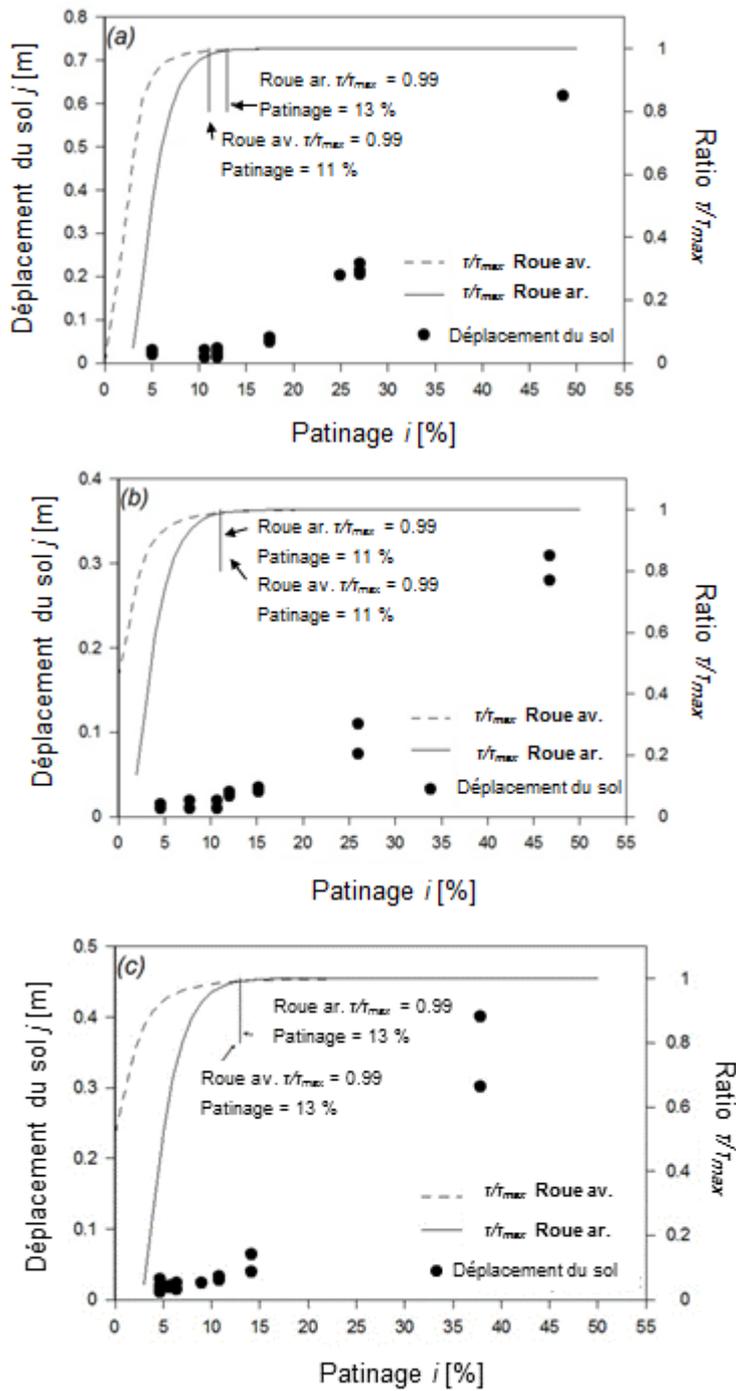


Fig. 37 : déplacement des agrégats j dans l'interface sol-pneumatique et ratio τ/τ_{max} en fonction du patinage i pour trois configurations de charge (tracteur 65 kW): a) RNJ, 4080 kg, 0.6 bar; b) RNJ, 4080 kg, 1.6 bar; c) RJAr+Av, 5660 kg, 0.6 bar [44].

5. Nomenclature

a	Coefficient (équation parabolique) dans le calcul de la surface de l’empreinte et de son évolution [m^{-1}]
b	Largeur du pneumatique, diamètre de l’assiette pénétrant le sol (essai de compressibilité oedomètre, bévamètre) [m]
b_{eM}	Consommation spécifique du carburant liée à l’énergie du moteur [g/kWh]
b_{er}	Consommation spécifique du carburant liée à l’énergie à la roue [g/kWh]
b_{ez}	Consommation spécifique du carburant liée à l’énergie nette de traction [g/kWh]
B_e	Consommation horaire de carburant [l/h]
c	Cohésion du sol [kPa]
DP	Force de traction (drawbar pull) [kN]
D_{rim}	Diamètre de la jante [m]
ds	Surface infinitésimale de l’empreinte [m^2]
dp_v	Charge verticale élémentaire subie par le pneumatique [kN]
e_0	Distance séparant le milieu de la roue et le point postérieur de la surface de l’empreinte [m]
e_t	Distance séparant le point de réaction du sol à la roue avec le point postérieur de la surface de l’empreinte (excentricité) [m]
GT	Force de traction à la roue (gross traction) [kN]
h	Hauteur de l’attelage [m]
$i_{f,r}$	Patinage à la roue avant (front), resp. à la roue arrière (rear) [%]
j	Déplacement du sol [m]
k	Module de cisaillement (module de Coulomb) [m]
K	Module d’élasticité à la compression [$kN/m^{(n+2)}$]
K_c	Module de cohésion à la déformation [$kN/m^{(n+1)}$]
K_{carc}	Rigidité de la carcasse du pneumatique [kN/m]
K_s	Rapport théorique de vitesse entre les roues avant et arrière
K_v	Coefficient vertical de rigidité par unité de longueur de l’empreinte [kN/m^2]
K_ϕ	Module de friction à la déformation [$kN/m^{(n+2)}$]
L	Empattement [m]
M_{GT}	Couple lié aux roues motrices [kNm]
M_r	Couple résistant [kNm]
n	Exposant lié à l’enfoncement dans le sol
NT	Force de traction nette [kN]
p	Pression moyenne au sol [kPa]
p_s	Composante verticale de la pression au sol [kPa]
P_i	Pression de gonflage [kPa]
PR	Résistance à la pénétration [N]
P_{GT}	Puissance générée par la roue [kW]
P_M	Puissance générée par le moteur [kW]
P_{NT}	Puissance nette de traction [kW]
q	Facteur de concentration
r	Rayon vecteur du milieu de la roue [m]
R	Rayon sans charge du pneumatique [m]
R_c	Résistance au tassement du sol [kN]
R_s	Réaction du sol à la roue [kN]

R_{GT}	Projection verticale de la distance entre le milieu de la roue et le point d'impact de la force de traction GT sur l'empreinte [m]
R_r	Rayon de la roue sous charge (m)
T	Couple total [kNm]
V	Vitesse absolue [m/s]
V_a	Vitesse actuelle vers l'avant [m/s]
V_{aj}	Projection tangentielle de la vitesse actuelle [m/s]
V_j	Vitesse de patinage [m/s]
V_ω	Vitesse du milieu de la roue [m/s]
$V_{\omega j}$	Projection tangentielle de la vitesse liée au milieu de la roue [m/s]
W	Composante verticale de la réaction du sol / Charge à la roue [kN]
W_0	Charge à la roue statique [kN]
x	Abscisse [m]
x_0	Longueur de l'empreinte [m]
z	Composante verticale (liée à la déformation du sol par tassement) [m]
z_{GT}	Distance séparant le fond de l'ornière et le point d'impact de la force de traction [m]
z_0	Profondeur de l'ornière [m]

Lettres grecques

α	Angle entre l'abscisse et la tangente de la surface infinitésimale de l'empreinte [°]
$\alpha_{V\omega}$	Angle entre l'axe vertical et le rayon vecteur r [°]
$\alpha_{\omega j}$	Angle entre le vecteur <i>vitesse</i> lié au centre de la roue et sa projection tangentielle sur l'empreinte [°]
δ	Déformation du pneumatique [m]
δ_D	Densité du carburant (diesel) [10^{-3} Mg/ 10^{-3} m ³]
Δ	Déformation du pneumatique sur revêtement dur [m]
ΔK_p	Rigidité du pneumatique liée à la pression de gonflage P_{in} [kN/mkPa]
η_{tr}	Efficiéce
μ_{tr}	Coefficient de traction
σ	Contrainte normale à la surface de l'empreinte [kPa]
σ_h	Composante horizontale de la contrainte au sol [kPa]
σ_m	Pression de contact moyenne [kPa]
σ_v	Composante verticale de la contrainte au sol [kPa]
σ_z	Contrainte verticale à la profondeur z dans le sol [kPa]
σ_1	Contrainte principale majeure [kPa]
σ_3	Contrainte principale mineure [kPa]
τ	Contrainte de cisaillement [kPa]
τ_{max}	Résistance au cisaillement [kPa]
φ	Angle de frottement (ou de friction) interne [°]
ω	Vitesse angulaire de la roue [s ⁻¹]

6. Bibliographie

- [1] Frutig F., Thees O., 2002. Bodenschonender Einsatz von moderner Holzerntetechnik. Kurs bei der Waldabteilung 5, Bern-Gantrisch. Eidgenössische Forschungsanstalt für Wald, Schnee und Landschaft, WSL.
- [2] Kutschenreiter W., 2008. Récolteuses totales pour betteraves sucrières. TA spécial. Technique Agricole. Octobre 2008, 4-7
- [3] Alakukku L., 2000. Response of Annual Crops to Subsoil Compaction in a Field Experiment on Clay Soil Lasting 17 years. In: Horn R., van den Akker J.J.H., Arvidsson J. (Eds). Subsoil Compaction. Advances in GeoEcology 32, Catena Verlag, 205-208.
- [4] Heinonen M., Alakukku L., Aura E., 2002. Effects of Reduced Tillage and Light Tractor Traffic on the Growth and Yield of Oats (*Avena sativa*). In: Pagliai M., Jones R., (Eds). Sustainable Land Management Environmental Protection. A Soil Physical Approach. Advanced in GeoEcology 35, Catena Verlag, 367-378.
- [5] Fringeli G., 2005. Bodenverdichtung durch Forstmaschinen. AK Forstliches Ingenieurwesen. Mündliche Mitteilung - Vortrag vom 13.01.2005
- [6] Battiato A., Diserens E., Sartori, L., 2011. Predicting topsoil damage from slip of tractor tyres: analysis of the soil cutting effect from the tread of traction tyres. 69th International Conference on Agricultural Engineering – Landtechnik AgEng 2011. 11-12.11. Hannover. Germany, 445-450
- [7] Arbeitsgruppe Boden, Bodenkundliche Kartieranleitung, 4. Aufl., Hannover 1996.
- [8] BGS Dokument, 1999. Physikalischer Bodenschutz. Konzept zur Umsetzung der rechtlichen Vorgaben im Umweltschutzgesetz (USG) und in der Verordnung über Belastung des Bodens (VBBo). BGS Dokument 9, 32 p.
- [9] ASABE, 2011. Agricultural Machinery Management Data. American Society of Agricultural and Biological Engineers. ASAE D497.7 MAR2011, 8 p.
- [10] Technische Ratgeber von den Reifenfirmen Avon, Bridgestone, Bandenmarkt, Continental, Dunlop, De Molen, Firestone, Fulda, Good Year, Kléber, Michelin, Nokia, Pirelli, Trelleborg, Vredstein.
- [11] ETRTO, 2009. European Tyre and Rim Technical Organisation. Standards Manual.
- [12] Bastgen H.M., Diserens E., 2009. q value for calculation of pressure propagation in arable soils taking topsoil stability into account. Soil & Tillage Research 102, 138–143.
- [13] Fröhlich O.K., 1934. Druckverteilung im Baugrunde, Verlag Julius Springer, Vienna, 185 p.
- [14] Lang H.-J., Huder J., 1982. Bodenmechanik und Grundbau. Das Verhalten von Böden und die wichtigsten grundbaulichen Konzepte. (Soil mechanics and foundation engineering. The behaviour of soils and the main foundation engineering concepts), Springer-Verlag. 226 p.
- [15] Diserens E., Steinmann G., 2002. Calculation of pressure distribution in moist arable soils in eastern Switzerland: a simple model approach for the practice. In: Vulliet L., Laloui L., Schrefler B. (Eds). Environmental Geomechanics – Monte Verità 2002. EPFL Press. 413–421.
- [16] Qasem H., Attinger W., Berli M., Schulin R., 2000. Zusammenhänge zwischen ödometrischer Verdichtungsempfindlichkeit und morphologischer Merkmale von Böden, untersucht an ausgewählten Standorten auf den Trassen der Transitgasleitungen Däniken–Grimsel (TRG 2) und Rodersdorf – Lostorf (TRG 3). Institut für Terrestrische Ökologie der ETH Zürich. 41 p.
- [17] Lebert M., 1989. Beurteilung und Vorhersage der mechanischen Belastbarkeit von Ackerböden. Band 12. Bayreuther Bodenkundliche Berichte. 131 p.
- [18] Lüscher P., Frutig F., Sciacca S., Spjevak S., Thees O., 2009. Physikalischer Bodenschutz im Wald. Bodenschutz beim Einsatz von Forstmaschinen. Merkblatt für die Praxis. Eidg. Forschungsanstalt WSL, 45, 12 p.

- [19] BGS, 2004. Definition und Erfassung von Bodenschadverdichtungen. Positionspapier der BGS-Plattform Bodenschutz. BGS Dokument – Dokument SSP 13, 56 p.
- [20] Brunotte J., Senger M., 2011. Wieder ein Gefühl für den Boden bekommen. Hilfsmittel zur Bodengefügeansprache durch den Praktiker. LOP 1/2 2012. 14-15
Klemmbrett erhältlich am Institut für Agrartechnologie und Biosystemtechnik des vTL. Bundesallee 50 - D 38116 Braunschweig. Fax ++49(0)531 596-4199
- [21] Nievergelt J., Petrasek M., Weisskopf P., 2002. Bodengefüge – Ansprechen und Beurteilen mit visuellen Mitteln. Eidgenössische Forschungsanstalt für Agrarökologie und Landbau, Zürich-Reckenholz. Schriftenreihe der FAL 41. 93 p.
- [22] Bundes-Bodenschutzgesetz (§ 17 Abs. 2), 1998. Gute fachliche Praxis der landwirtschaftlichen Bodennutzung, Bundes-Bodenschutzgesetz vom 17. März 1998
<http://www.gesetze-im-internet.de/bbodschg/BJNR050210998.html>
- [23] Gute fachliche Praxis zur Vorsorge gegen Bodenschadverdichtungen und Bodenerosion, 2002. Herausgeber: Bundesministerium für Verbraucherschutz, Ernährung und Landwirtschaft (BMVEL)
- [24] Spiess E., Diserens E., 2001. Zuckerrüben: Erntetechnik und Bodenschutz. FAT Berichte Nr. 567. 20 p.
- [25] FAL. 1997. Kartieren und Beurteilen von Landwirtschaftsböden, Schriftenreihe der FAL 24
- [26] Prochnow A., Kraschinski S., 2001. Angepasstes Befahren von Niedermoor-grünland. DLG Merkblatt 323. 16 p.
- [27] Hasinger G., Keller L., Marendaz E., Neyroud J.-A., Vökt U., Weisskopf P., 1993. Bodenbeurteilung im Feld. Hrsg. Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft (BUWAL), Bern. Verlag UFA-Revue.
- [28] FAL. Vorbelastungsmessungen von 12 Standorten im Ackerbaugebiet der Schweiz. (Unveröffentlicht)
- [29] Jacke H., Brokmeier H., Sengpiel A. 2008. PrAllCon-Slash: Druckverteilung von Forstreifen unter Reisigarmierung. ifa-Mitteilungen Reihe A, Heft 5
- [30] Jacke H., Sengpiel A., Brokmeier H. 2008. PrAllCon-Track: Zur Wirkung von Bogiebändern auf den Kontaktflächendruck. ifa-Mitteilungen Reihe A, Heft 6
- [31] Berner D., 2012. Roues larges et traffic routier. *Technique Agricole* 6/7 2012. 20.
- [32] Diserens E., 2009. Calculating the contact area of trailer tyres in the field. *Soil & Tillage Research* 103, 302–309.
- [33] Diserens E., Duboisset A., Dufosse P., Alaoui A., 2011. Prediction of the Contact Area of Agricultural Traction Tyres on Firm Soil. *Biosystems Engineering*, 110(2), 73-82.
- [34] 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.
- [35] 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.
- [36] Diserens E., Schenk C., 2005. Reifendruck-Regelanlage mit innenliegender Luftübertragung. *Agrsocope Tänikon - Informationstagung Landtechnik*, 11.-12.10.2005, 3 p.
- [37] Görtmüller L., 2002. Oft ist mehr drin, als man braucht... *Profi Technik Profi* Nr. 4/02, 66-69
- [38] Diserens E., Abdallah A., 2011. Contact area of agricultural tyres, estimation. *Encyclopedia of Ag-rophysics. Encyclopedia of Earth sciences Series*. In: Glinsky J., Horabik J., Lipiec J., (Eds). Institute of Agrophysics, Polish Academy of Sciences Lublin. Springer Verlag, AA Dordrecht, The Netherlands. 148-153.
- [39] Geischer R., 2011. Bodenbelastung und Bodenbeanspruchung unterschiedlicher Fahrwerkskonfigurationen. Dissertation an dem Lehrstuhl für Agrarsystemtechnik. Technische Universität München. 191 p.

- [40] Horn R., Lebert M., 1994. Soil Compactability and Compressibility. In: B.D. Soane, van Ouwerkerk C. (Eds.). Soil Compaction in Crop Production. Elsevier Verlag., 45–69.
- [41] Petelkau H., 1991. Ertragliche Auswirkungen technogener Schadverdichtungen der Ackerkrume. Agrartechnik, Berlin 41 (1991) 2, 54–57.
- [42] Osetinsky A., Shmulevich I., 2004. Traction Performance Simulation of a Pushed/Pulled Driven Wheel. Transactions of the ASAE, American Society of Agricultural Engineers, Vol. 47(4). 981-994.
- [43] Hettiaratchi D.R.P., Reece A.R., 1974. The calculation of passive soil resistance. Geotechnique, 24(3), 45-67.
- [44] Battiato A., 2012. Tyres, drawbar pull and trafficability: new ways to assess soil vulnerability. Final report. June 2012. Agroscope Reckenholz-Tänikon ART, 82 p.
- [45] Wong J.Y., 2008. Theory of ground vehicles. John Wiley & Sons, Inc. 4th Edition. 560 p.
- [46] Lines J.A., Murphy K., 1991. The stiffness of agricultural tractor tyres. J. Terramech. 28(1), 49-64.
- [47] Shmulevich I., Osetinsky A., 2003. Traction performance of a pushed/pulled drive wheel. J. Terramech., 40(1), 35-50 (18).
- [48] Janosi Z., Hanamoto B., 1961. The analytical determination of drawbar pull as a function of slip for tracked vehicles in deformable soils. In: Proceedings of the 1st International Conference on the Mechanics of Soil-Vehicle Systems, Edizioni Minerva Tecnica, Torino, Italy, pp. 707-736.
- [49] Battiato A., Diserens E., 2013. Influence of Tyre Inflation Pressure and Wheel Load on the Traction Performance fo a 65 kW MFWD Tractor on a Cohesive Soil. Journal of Argicultural Science. Vol 5, No. 8; 197-215.
- [50] Landis M., Schiess I., 2006. Geprüfte Traktoren, Zweiachsmäher und Transporter. FAT-Berichte Nr. 653. 12 p.
- [51] Schäffeler U., Keller M., 2008. Treibstoffverbrauch und Schadstoffemissionen des Offroad-Sektors. Studie für die Jahre 1980-2020, UW 08-28 D, Bundesamt für Umwelt BAFU, Bern, 172 p.
- [52] Fendt H., 2008. Die schwere Kindheit des Vario-Getriebes der Firma X. Fendt &Co - Persönliche Erinnerungen von Prof. H. Fendt. Fendt Chronik, Jan.2008.
- [53] Kutzbach H.-D. 1989. Lehrbuch der Agrartechnik – Band 1. Allgemeine Grundlagen Ackerschlepper, Fördertechnik. Pareys Studentexte 37. 245 S.
- [54] Queitsch K., Schulz H., Kobelt P., 1984. Energetische Analyse am Maschinen-Traktor-Aggregat bei Zugarbeit. Agrartechnik, Berlin 34, 10, 437-440.
- [55] Stadler E., Schiess I., 2000. Geprüfte Traktoren, Zweiachsmäher und Transporter. FAT-Berichte Nr. 552. 12 p
- [56] Verbrugge J.-C., 1993. Construction du Genie Rural. Vol. 1-2. Presses Universitaires de Bruxelles. 328 p.
- [57] Reece A.R., 1965. The fundamental equation of earthmoving mechanics. Symposium of Earthmoving Machinery, Institute of Mechanical Engineers, 179, Part 3F, London.
- [58] McKyes E., 1985. Soil Cutting and Tillage. Developments in Agricultural Engineering 7. Elsevier, Amsterdam, the Netherlands.

7. TASC* dans la presse spécialisée

- *BauernZeitung* - 36 Apg.5.9.2014. Brandenburg, Mecklenburg, Sachsen. Erst rechnen, dann fahren. 60-61
- *Landpost* – Nr. 30, 26. Juli 2014. *Deutsches Wochenblatt*. Bodenschäden vorbeugen und Treibstoff sparen. 12-13
- *Algäuer Bauernblatt* 22/2014. Bodenschäden vorbeugen und Treibstoff sparen. 28-30
- *Die Grüne* Nr. 3/2014. Verdichtungen vor dem Schaden erkennen. 26-28
- *Schweizer Landtechnik* 9 2013. Parameter der Bodenschonung beim Maschineneinsatz, 36-37
- *Der fortschrittliche Landwirt* 16/2013. Verdichtungen minimieren. 60-61
- *LANDfreund* 10/2012. Steigern Sie die Leistung Ihrer Reifen. 22-25
- Exelagrinews no 2, 2010. Le magazine des partenaires *MICHELIN Exelagri*. 14-15
- *die Grüne* 4/2010. Das Comeback des Doppelrades. 7-11
- *Profi* 5/2010. Bodenschonung mit dem Rechner. 96-98
- *Landtechnik* 5/2008 - 63. Entwicklung der mechanischen Bodenbelastung bei Zuckerrübensvollerntern. 274–275
- *UFA Revue*, 9/2007. Gefahr oder gelöstes Problem? 24–25
- *Die Grüne* / Nr. 19/2007. Anhängerreifen als Gefahr für den Boden.
- *Eilbote* 17/2006. Mittels PC den Boden schonen. 10–11
- *Landfreund* 12/2006. Kleine „Lademonster“ im Vergleich. 28–35
- *Landtechnik* 5/2006 - 61. Entwicklung der mechanischen Bodenbelastung bei Mähdrescher. 254–255
- *Blick ins Land*. 01/2006. Ein PC-Programm für mehr Bodenschutz. p. 13
- *Landfreund* – 1/2006. Mittels PC den Boden schonen. 36–39
- *Techniques Culturelles Simplifiées*. No 35 Novembre–Décembre 2005. Un logiciel pour comparer l'impact des pneus sur le sol. p. 24
- *Neue Landwirtschaft* 9/2005. Berechnen, was im Boden passiert. 54–55
- *Die Grüne* /Herausgabe 10.10.04 Nr.21 /2004. Bodentragfähigkeit höher als Radlast. p.14–15
- *Profi* Nr. 10/04. Mit TASC Bodenverdichtung abschätzen. p. 6

* TASC (Tyres/Tracks And Soil Compaction)

TASC - Annexes

Annexe 1 – recommandations pratiques pour protéger le sol

Règle de base pour les sols agricoles

Si l'utilisation du sol vise d'abord à „produire“, c'est par l'action préventive qu'il est possible de protéger sa structure dans le long terme des dégâts de compactage [8].

Priorité 1 : le sous-sol

Il s'agit là de tenir compte simultanément des caractéristiques du sol et des charges qui lui sont administrées afin d'exclure tout risque sérieux de compactage sévère (fig. 38) [24].

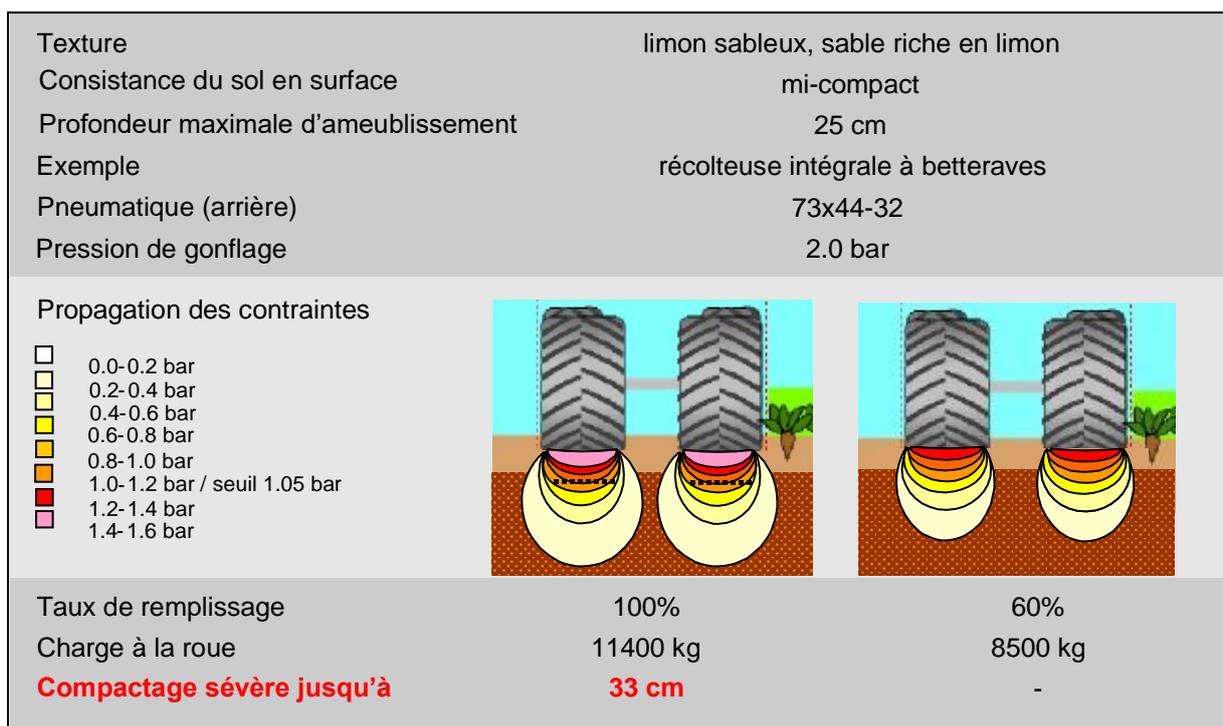


Fig. 38 : risque de compactage sévère avec en exemple la récolteuse intégrale de betteraves - Trémie pleine (gauche) et partiellement remplie (droite).

Priorité 2 : le sol en surface

Ce n'est que lorsque les risques non négligeables de compactage sévère dans le sous-sol sont écartés que la question de la protection du sol en surface se justifie.

Patinage, force de traction et cisaillement du sol

Le patinage survient lors de tout effort de traction, si minime soit-il. Ce n'est qu'à partir d'un certain seuil de patinage que le sol est définitivement cisailé. Pour éviter dès lors le cisaillement, se tenir aux recommandations suivantes :

- Eviter de travailler un sol trop dur ou trop humide voire détrempé.
- Maintenir la surface de l'interface sol-pneumatique suffisamment élevée (roues jumelées, basse pression de gonflage) lorsque la force de traction nécessaire est importante.
- Adapter le poids du tracteur (avec ou sans ballast) à la force de traction requise.

Le passage multiple

Les sols avec moins de 30% d'argile et plus de 50% de sable (sables, limons sableux, limons) sont moins sensibles que les sols lourds aux dégâts occasionnés dans les voies de passage. Les particules de faible cohésion se laissent facilement ameublir, leur coefficient de perméabilité reste élevé. Les surfaces foulées ne sont pas compromises ; on cherchera donc à obtenir plutôt **une répartition des charges optimales sur une surface foulée élevée**, en particulier pour les limons relativement peu portants.

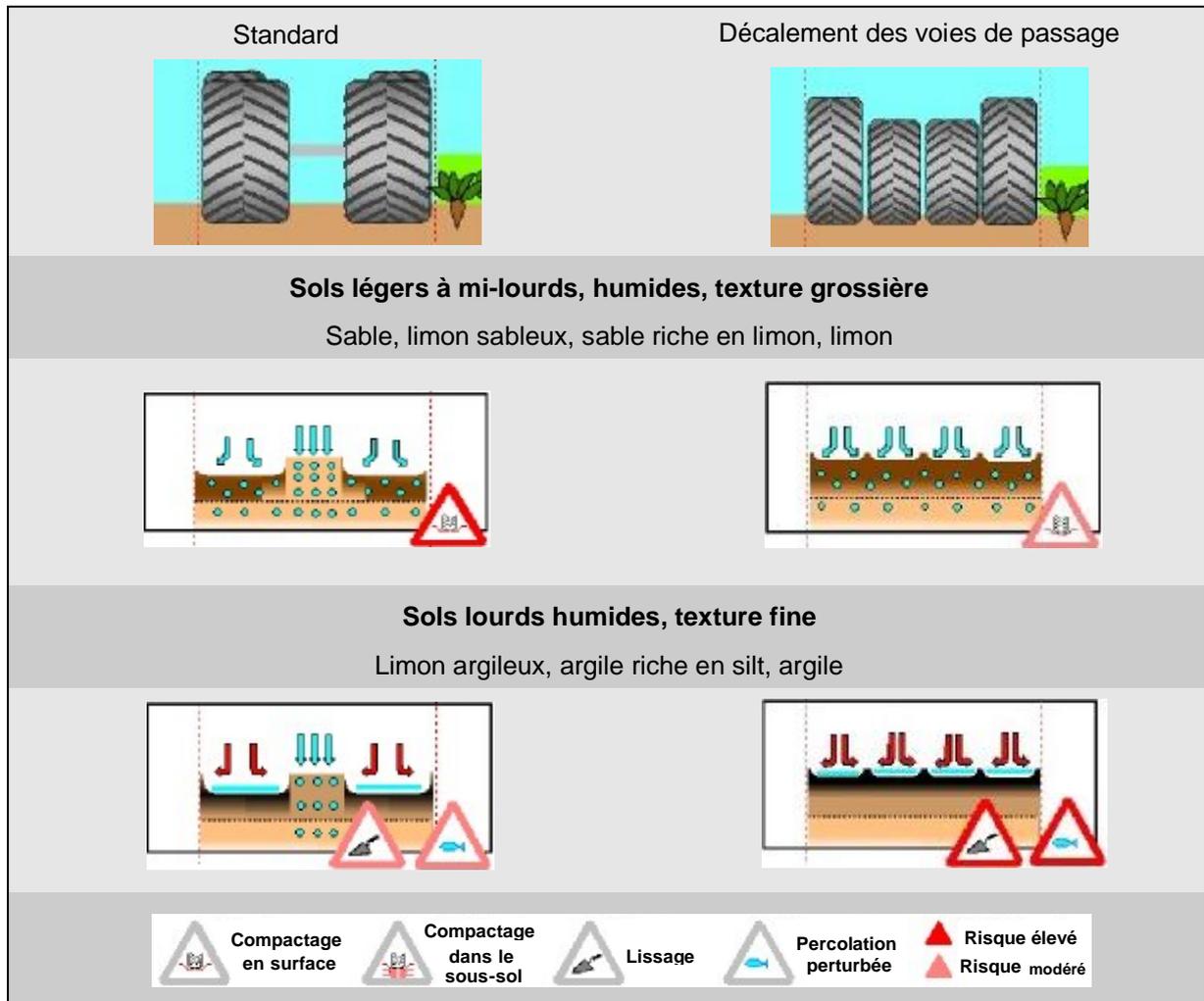


Fig. 39 : vulnérabilité du sol en surface compte tenu de sa texture.

Les sols ayant plus de 30% d'argile (limon argileux, silt, argile) sont particulièrement vulnérables au cisaillement, au malaxage et au lissage. En conditions humides, les particules adhèrent et collent. Il se forme dans les ornières une pellicule lisse imperméable. L'eau météorique ne percole plus mais stagne. La structure du sol est compromise. Dans le dévers, des dégâts d'érosion se manifestent en périodes pluvieuses prolongées. Ces sols particulièrement sensibles doivent être foulés avec retenue, sur **une surface la plus restreinte possible** (Fig. 39) [24]. A noter que, pour ces sols lourds, un travail diminué du sol ainsi qu'une couverture végétale autant que possible permanente, renforcent à long terme et la structure et la portance du sol.

Annexe 2

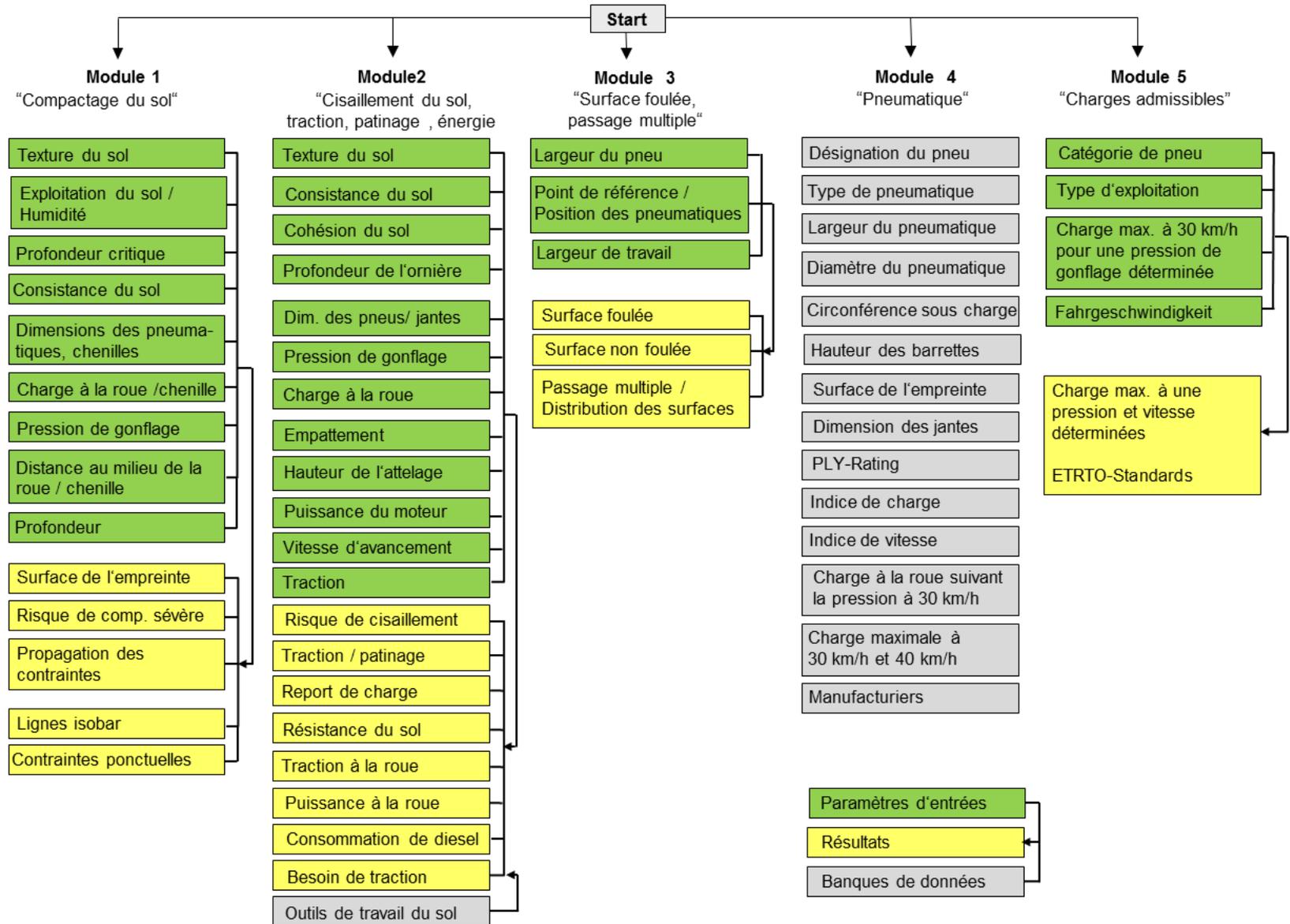


Fig. 40 : ordigramme TASC.

Annexe 3 – principe d'appréciation des risques de dégradation de la structure du sol

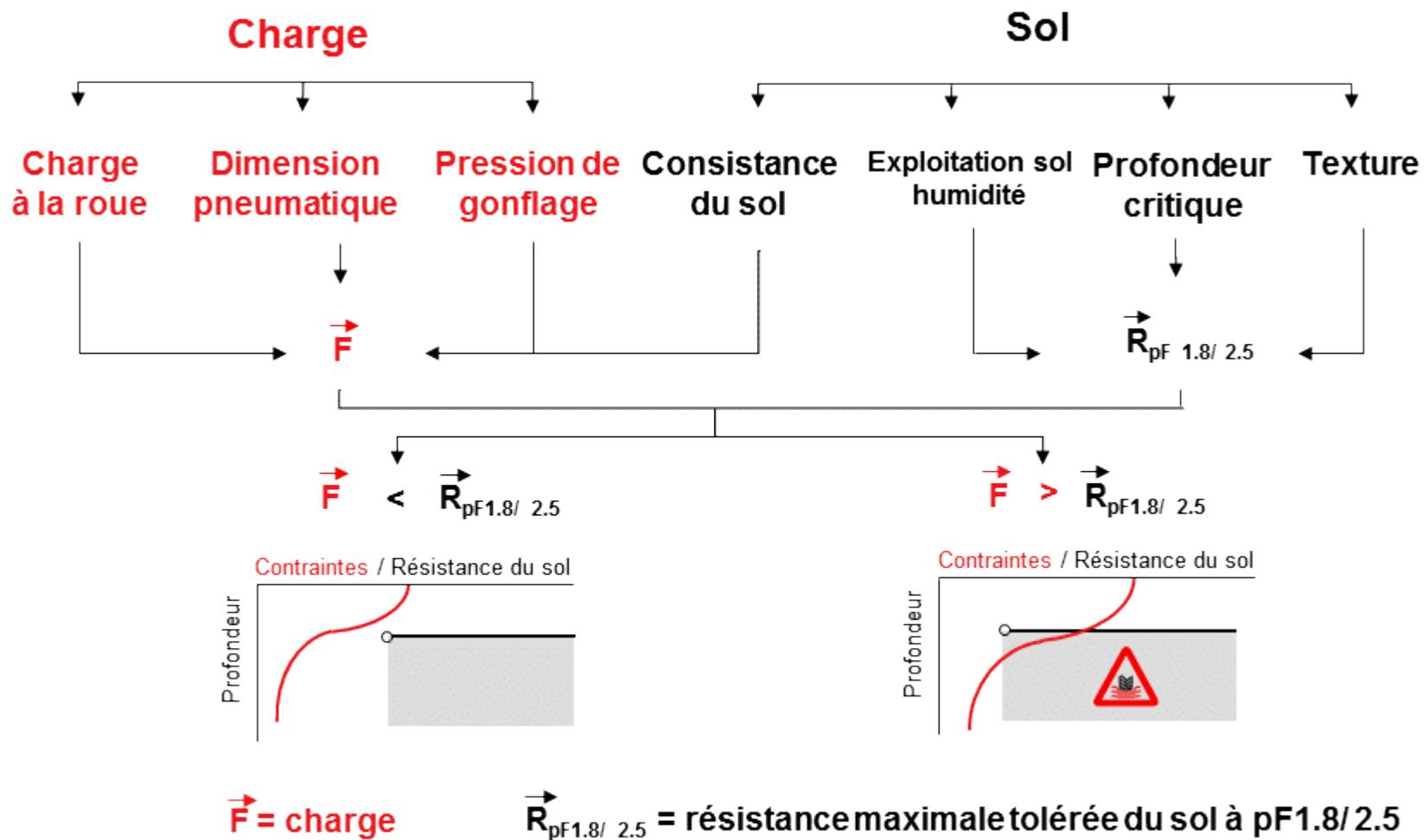


Fig. 41 : principe d'appréciation des risques sévères de compaction.

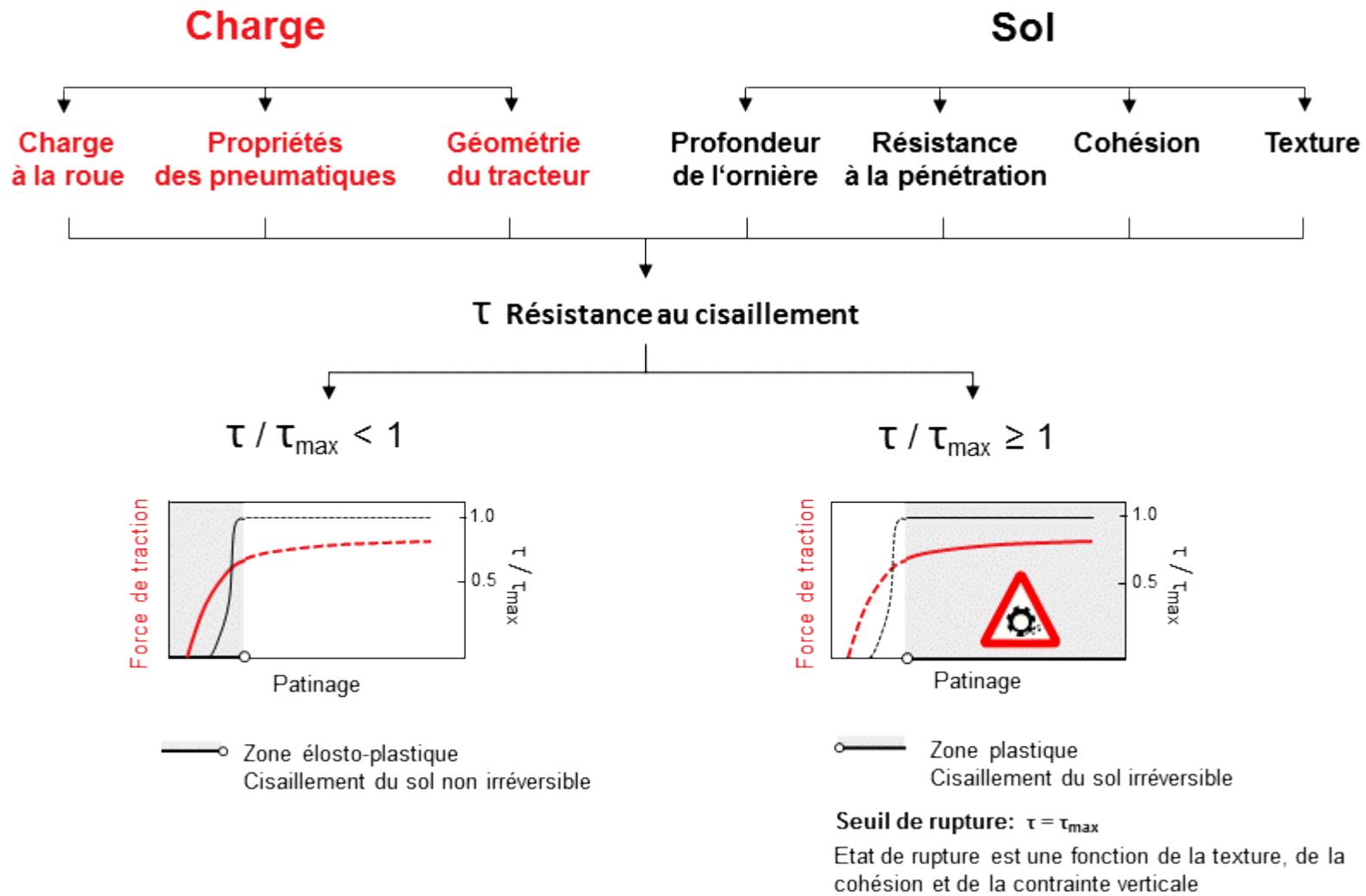


Fig. 42 : principe d'appréciation des risques de cisaillement.

Annexe 4 - évaluation de la charge statique maximale par essieu pour les tracteurs

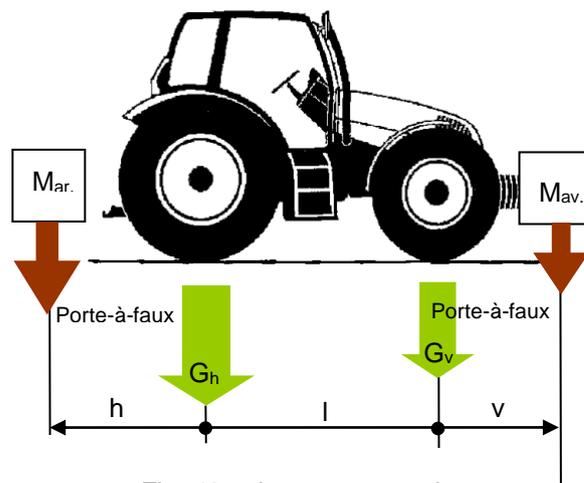


Fig. 43 : charges par essieu.

Formules avec calculs intermédiaires :

Avec lest frontal

Exemples (voir ci-dessous)

Essieu avant:	$G_{av1} = AV + M_{av}[(v + l) / l]$	3032 kg
Essieu arrière:	$G_{ar1} = AR - M_{av}(v / l)$	3748 kg
Poids total:	$G_{T1} = AV + AR + M_{av}$	6780 kg

Avec lest arrière

Essieu avant:	$G_{av2} = AV - M_{ar}(h / l)$	1152 kg
Essieu arrière:	$G_{ar2} = AR + M_{ar}[(h + l) / l]$	6628 kg
Poids total:	$G_{T2} = AV + AR + M_{ar}$	7780 kg

Avec lest frontal et lest arrière

Essieu avant:	$G_{av3} = G_{av1} - M_{ar}(h / l)$	1632 kg
Essieu arrière:	$G_{ar3} = G_{ar2} - M_{av}(v / l)$	6548 kg
Poids total:	$G_{T3} = AV + AR + M_{av} + M_{ar}$	8180 kg

AV : poids axe avant sans charge suppl. [kg]

M_{av} : poids du frontal [kg]

G_{av1} : poids essieu avant avec frontal [kg]

G_{ar1} : poids essieu arrière avec frontal [kg]

G_{av3} : poids essieu avant (front + charge ar.) [kg]

G_{ar3} : poids essieu arrière (front + charge ar.) [kg]

G_{T3} : poids total (frontal + charge ar.) [kg]

v : porte-à-faux avant* [cm]

AR : poids ess. ar. sans charge suppl. [kg]

M_{ar} : poids charge arr. (outil attel.) [kg]

G_{av2} : poids essieu av. avec charge arr. [kg]

G_{ar2} : poids essieu ar. avec charge arr. [kg]

G_{T1} : poids total avec frontal [kg]

G_{T2} : poids total avec charge arrière [kg]

l : empattement [cm]

h : porte-à-faux arrière* [cm]

* Distance entre l'essieu av. resp. ar. et le centre de gravité des charges attelées supplémentaires (fig. 88).

Valeurs indicatives (manuel technique Kléber)

		Essieu arrière	Essieu avant	
Tracteur 4 roues motrices		60 %	40 %	
Tracteur traction arrière		70 %	30 %	
Tracteur Trac		50 %	50 %	
John Deere Série 8000		40 %	60 %	
Catégorie	Outils	Coefficient de charge*	Charges maximales Essieux AV/AR	Charge supplémentaire
Charge frontale	–	1,2	AV : 30, 40, 50, 60 % + AR : 40, 50, 60, 70 % +	1,2 x M _{av} –
Outils à faible porte-à-faux	Pulvérisateur, semoir à engrais, herse axe vertical, faucheuse frontale, charrue bisocs	1,5	AV : 30, 40, 50, 60 % + AR : 40, 50, 60, 70 % +	1,5 x M _{av} 1,5 x M _{ar}
Porte-à-faux équivalent à l'empattement	Décompacteur, herse à disques, chargeur frontal, charrue 3-, 4-socs	2,0	AV : 30, 40, 50, 60 % + AR : 40, 50, 60, 70 % +	2,0 x M _{av} 2,0 x M _{ar}
Porte-à faux supérieur à l'empattement	Semoir combiné, charrue 5 socs	2,5	AV : 30, 40, 50 % + AR : 50, 60, 70 % +	– 2,5 x M _{ar}
Outil avec roue de soutien	Charrue 6-12 socs, citerne à purin, épandeur à fumier, pulvérisateur traîné, remorque	très variable	AV : 30, 40, 50 % + AR : 50, 60, 70 % +	– Charge timon

Exemple :

Tracteur (4 roues motrices): poids à vide 6380 kg; charrue 4 socs 1400 kg; charge au frontal 400 kg; empattement 230 cm; porte-à-faux avant: 46 cm; porte-à-faux arrière: 230 cm

Charge essieu avant*: $(6380 \times 0,4) + (400 \times 1,2) - (1400 \times 1) = 1632 \text{ kg}$

Charge à la roue avant : $1632 / 2 = 816 \text{ kg}$

Charge essieu arrière : $(6380 \times 0,6) + (1400 \times 2) - (400 \times 0,2) = 6548 \text{ kg}$

Charge à la roue arrière : $6548 / 2 = 3274 \text{ kg}$

* Il est à relever que la charge frontale est plutôt faible, puisqu'un minimum de 20 % de la charge totale doit revenir à l'essieu avant.

Pour le calcul des charges statiques, il est aussi possible de recourir au tool d'Agroscope „Berechnungsprogram Achslasten“ disponible à ce jour qu'en allemand en cliquant le lien suivant :

<http://www.services.art.admin.ch/traktor/d/tt2013d.html>

Annexe 5 – prépondérance

La prépondérance A correspond au rapport relatif de la vitesse de la circonférence des roues avant par rapport à la vitesse de la circonférence des roues arrière.

Pour avancer sans problème, un véhicule à traction intégrale doit avoir des roues avant qui tournent avec une avance nulle de rotation A ou tout au plus de 5 % (vitesse de la circonférence des roues avant > vitesse de la circonférence des roues arrière).

Tout autre écart de rotation a des effets négatifs sur la stabilité dynamique du véhicule, sur l'usure des pneumatiques et sur la mécanique de transmission. Si le rayon effectif des roues avant est trop petit ($A < 1 \%$) parce que la pression de gonflage est trop basse ou que le diamètre extérieur des pneumatiques est trop petit, les roues arrière ont tendance à pousser les roues avant. A l'inverse, si le rayon effectif des roues arrière est trop petit (à cause de la pression de gonflage ou de la dimension des pneumatiques), les roues avant ont tendance à tirer les roues arrière, ce qui provoque une usure anormale des pneumatiques ($A > 5 \%$). Les contraintes mécaniques qui s'exercent sur la boîte de transmission, l'usure des pneumatiques et le facteur de patinage augmentent dans les deux cas. Pour ces raisons, les fabricants de pneumatiques (Kléber) indiquent les jeux de pneumatiques avant/arrière recommandés pour chaque type de véhicule.

Calcul de la prépondérance :

$$A = \left(\frac{U_v \times k_m - U_h}{U_h} \right) \times 100$$

où: A = prépondérance [%]

U_v = développement des roues avant (traction 4x4 débrayée) [cm]

U_h = développement des roues arrière (traction 4x4 débrayée) [cm]

k_m = rapport mécanique entre roues avant et roues arrière

$$k_m = n_{uv} / n_{uh}$$

où: n_{uv} = nombre de tours + fraction de tour (roues avant) avec traction 4x4 enclenchée

n_{uh} = nombre de tours (roues arrière) avec traction 4x4 enclenchée

Mesure de la circonférence des roues*

- Tracteur seulement équipé d'une charge avant standard,
- Pression de gonflage des pneumatiques 1.6 bar,
- Piste libre d'au moins 50 m, aussi plane et unie que possible,
- Traction 4x4 débrayée (roues avant et roues arrière non couplées),
- Marquer d'un trait le flanc des pneumatiques, au milieu de la surface de contact,
- Marquer d'un trait le sol à la hauteur du trait-marqueur des pneumatiques,
- Effectuer pour roues avant puis roues arrière au moins 5 tours de roue,
- Marquer d'un trait de référence le sol à la fin du nombre de tours de roue (5),
- Mesurer la distance parcourue successivement par les roues avant et arrière,
- $U_v = \text{distance parcourue (a)} / \text{nombre de tours de roue avant} = a/5$,
- $U_h = \text{distance parcourue (b)} / \text{nombre de tours de roue arrière} = b/5$.

Mesure du rapport mécanique*

- Enclencher la traction 4x4,
- Marquer d'un trait le flanc des pneumatiques au milieu de la surface de contact,
- Le tracteur doit au moins effectuer 5 tours de roue arrière (n_{uh}),
- Relever le nombre correspondant de rotations complètes incluant la fraction de rotation finale pour les roues avant (n_{uv}).

* Données Trelleborg

Annexe 6 – Formulaire pour tests et relevés au champ - Risques de dégradation du sol (compaction)

A. Situation

Date :	Parcelle :	Types de stations forestières*/ Culture :
* Consulter <i>Gestion durable des forêts de protection</i> OFEFV, 2005		

B. Sol

Profondeur critique, profondeur d'ameublissement [cm]:			
Texture du sol à la profondeur critique (test tactile)			
1. <input type="checkbox"/> sol argileux (> 40 % argile, < 50 % silt)	colle, surface brillante, grains imperceptibles, forme un boudin de l'épaisseur de l'ongle	4. <input type="checkbox"/> limon sableux, sable limoneux (10–20 % argile, < 50 % silt)	peu de grains de sable visibles et perceptibles, peu cohésif, forme un boudin de l'épaisseur d'un crayon
2. <input type="checkbox"/> sol silteux (> 50 % silt)	savonneux à l'état humide, adhère mais ne colle pas	5. <input type="checkbox"/> sables (0–10 % argile, < 50 % silt)	peu ou pas cohésif, peu malléable, fendillé, friable, grains nettement perceptibles, n'adhère ni ne colle
3. <input type="checkbox"/> limon argileux, Limons (20–40 % argile, < 50 % silt)	adhère et colle à l'état humide, surface mate	6. <input type="checkbox"/> valeurs mesurées : % argile:	% silt:
Humidité à la profondeur critique (test tactile)**			
1. <input type="checkbox"/> sec pF 2.5	agrégats difficiles à casser... Paume de la main reste sèche, aucune sensation de froid sur le dos de la main		
2. <input type="checkbox"/> humide pF 1.8	agrégats friables, n'adhèrent pas à la peau, sensation de froid sur le dos de la main		
3. <input type="checkbox"/> saturé pF < 1.8	agrégats pétrissables, pâteux, lentille d'eau visible en pressant le sol entre les doigts, percolation de l'eau dans un forage		
** en forêt: durée d'attente supérieure à celle au champ. En période à forte évapotranspiration, le temps d'attente est écourté			
Dureté du sol (test au tournevis / tournevis n° 4 – tête 6 mm de large, 1 mm d'épaisseur - § 4.2.4.)			
1. <input type="checkbox"/> dure	avec la pression du poing, le tournevis pénètre jusqu'à une profondeur de 10 cm, résistance à la pénétration supérieure à 8 kgf	3. <input type="checkbox"/> tendre	le tournevis tenu entre le pouce et l'index pénètre sans effort jusqu'à une profondeur de 10 cm, résistance à la pénétration entre 0 et 5 kgf
2. <input type="checkbox"/> semi-dure	le tournevis tenu à pleine main pénètre le sol à 10 cm de profondeur, résistance à la pénétration comprise entre 5 et 7.9 kgf	4. <input type="checkbox"/> valeur mesurée	... kgf

C. Charge des machines

Travaux en forêt/ au champ :									
Variante	Machine	Pneumatique	Charge roue [kg]***	Pression gonflage [bar]	Variante	Machine	Pneumatique	Charge roue [kg]***	Pression gonflage [bar]
1.					3.				
2.					4.				
*** charge statique – lors d'un effort de traction, considérer la charge dynamique (transfert de charge de l'essieu avant vers l'essieu arrière) – la charge varie avec la force de traction - consulter les valeurs du second module TASC.									

Risques de dégradation du sol (cisaillement) et besoins en force de traction

A. Situation

Date :	Parcelle :	Types de stations forestières*/ Culture :	Variante :	Pente :
* Consulter <i>Gestion durable des forêts de protection</i> OFEFV, 2005				

B. Boden

Texture du sol à la profondeur critique** (test tactile)			
1. <input type="checkbox"/> sol argileux (> 40 % argile, < 50 % silt)	colle, surface brillante, grains imperceptibles, forme un boudin de l'épaisseur de l'ongle	4. <input type="checkbox"/> limon sableux, sable limoneux (10–20 % argile, < 50 % silt)	peu de grains de sable visibles et perceptibles, faiblement cohésif, forme un boudin de l'épaisseur d'un crayon
2. <input type="checkbox"/> sol silteux (> 50 % silt)	savonneux à l'état humide, adhère mais ne colle pas	5. <input type="checkbox"/> sables (0–10 % argile, < 50 % silt)	peu ou pas cohésif, peu malléable, fendillé, friable, grains nettement perceptibles, n'adhère ni ne colle
4. <input type="checkbox"/> limon argileux, limons (20–40 % argile, < 50 % silt)	adhère et colle à l'état humide, surface mate		
** Le calcul de la force de traction tient compte également de la texture du sol, à cette différence près qu'aucune distinction n'est faite entre les classes 2 et 3, 4 et 5. Nombre de classes distinctes : 3.			
Dureté du sol (test au tournevis / tournevis n° 4 – tête 6 mm de large, 1 mm d'épaisseur)			
3. <input type="checkbox"/> dure	avec la pression du poing, le tournevis pénètre jusqu'à une profondeur de 10 cm, résistance à la pénétration supérieure à 8 kgf	3. <input type="checkbox"/> tendre	le tournevis tenu entre le pouce et l'index pénètre sans effort jusqu'à une profondeur de 10 cm, résistance à la pénétration entre 0 et 5 kgf
4. <input type="checkbox"/> semi-dure	le tournevis tenu à pleine main pénètre le sol à 10 cm de profondeur, résistance à la pénétration comprise entre 5 et 7.9 kgf		
Cohésion du sol*** (test à la houe ou piochard / longueur du manche 140 cm, hauteur de la lame 20 cm, largeur de la lame 14 cm)			
1. <input type="checkbox"/> très faible	avec la houe, séparation du sol d'une main. Force exercée : ≈ 18 kgf	4. <input type="checkbox"/> élevée	avec la houe, séparation du sol avec les deux mains, jambes pliées. Force exercée : ≈ 46 kgf
2. <input type="checkbox"/> faible	avec la houe, séparation du sol avec les deux mains. Force exercée : ≈ 26 kgf	5. <input type="checkbox"/> très élevée	avec la houe, séparation du sol plus guère possible. Force exercée : dès ≈ 55 kgf
3. <input type="checkbox"/> moyenne	avec la houe, séparation du sol avec une main et jambes pliées. Force exercée : ≈ 34 kgf	hauteur du manche [cm] : _____ longueur de pénétration de la lame [cm] : _____	
*** en renonçant au test de la houe, les données de profondeur de l'ornière et de hauteur des barrettes recommandées ci-dessous ne sont pas nécessaires.			
Déformation du sol (profondeur de l'ornière – empreinte des barrettes)			
roue avant [cm]: _____ roue avant jumelée [cm]: _____		roue arrière [cm]: _____ roue arrière jumelée [cm]: _____	

C. Configuration de la machine

Puissance du moteur, vitesse d'avancement et géométrie									
Puissance max. [kW]:			Vitesse d'avancement [km/h]:			Empattement [cm]:		Hauteur de l'attelage [cm]*:	
* hauteur du crochet d'attelage - pour les outils attelés au trois points, hauteur du bras inférieur d'attelage (position de base parallèle à la surface du sol)									
Charge de la machine									
Position des roues	Pneumatique	Charge à la roue [kg**]	Pression gonflage [bar]	Hauteur barrettes [cm]	Position des roues	Pneumatique	Charge à la roue [kg**]	Pression gonflage [bar]	Hauteur barrettes [cm]
roue avant					roue arrière				
roue jumelée avant					roue jumelée arrière				
** charge statique unique avec ou sans roue jumelée									
Outil attelé et besoins en traction***									
Outil ****		Largeur de l'outil [m]		Nombre de rangs [n]		Nombre de corps d'outil [n]		Profondeur de travail [m]*****	
*** données sur la texture du sol (Partie B) et la vitesse d'avancement nécessaires pour le calcul de la force de traction nécessaire. Besoins en force de traction selon ASAE Standard D.497.7 March 2011									
**** outils exclusivement traînés pour les travaux d'ameublissement du sol (en profondeur et superficiel) de semis et de soins (engrais, traitements phytosanitaires)									
***** semoir sans outil ameublissant, introduire 0.01 m pour la profondeur de travail									

Distribution des surfaces foulées et passage multiple

A. Situation

Date :	Parcelle :	Culture :	Pente :
--------	------------	-----------	---------

B. Configuration de la machine*

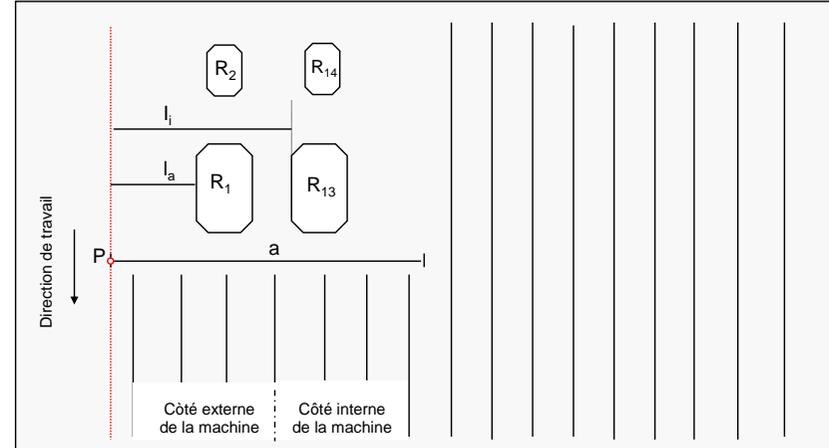
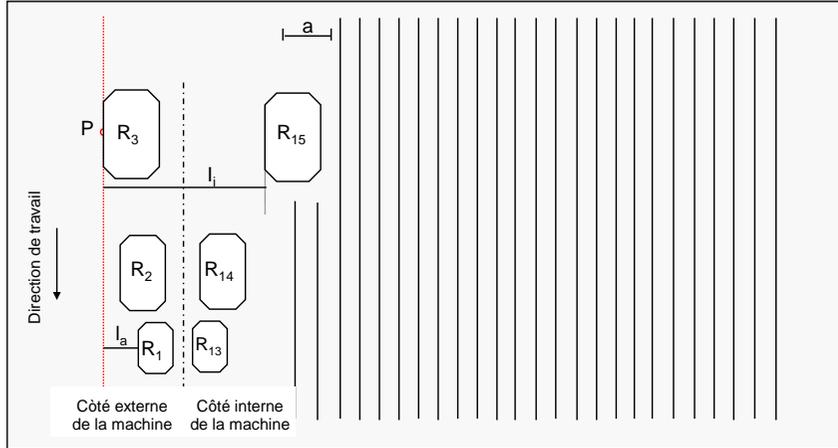
Point de référence					
Largeur de travail < écart hors-tout des pneumatiques <input type="checkbox"/> point de référence en bordure de machine			Largeur de travail > écart hors-tout des pneumatiques <input type="checkbox"/> point de référence en bordure de champ		
Largeur de travail [m] :					
Disposition et largeur des roues					
Côté externe			Côté interne		
Numéro de roue	Largeur de roue [m]	Distance à la roue l_a [m]	Numéro de roue	Largeur de roue [m]	Distance à la roue l_i [m]
roue 1			roue 13		
roue 2			roue 14		
roue 3			roue 15		
roue 4			roue 16		
roue 5			roue 17		
roue 6			roue 18		
roue 7			roue 19		
roue 8			roue 20		
roue 9			roue 21		
roue 10			roue 22		
roue 11			roue 23		
roue 12			roue 24		

* voir figure 44 ci-dessous

Ecart hors-tout des pneumatiques > largeur de travail

Ecart hors-tout des pneumatiques < largeur de travail

1 convoi



≥ 2 convois

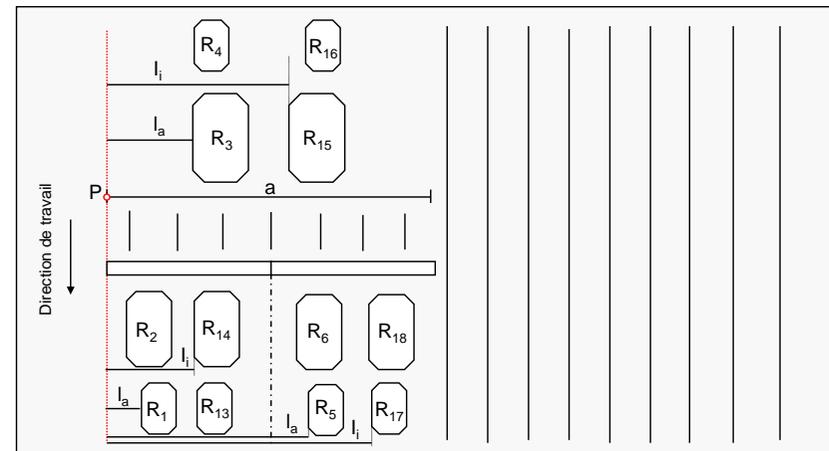
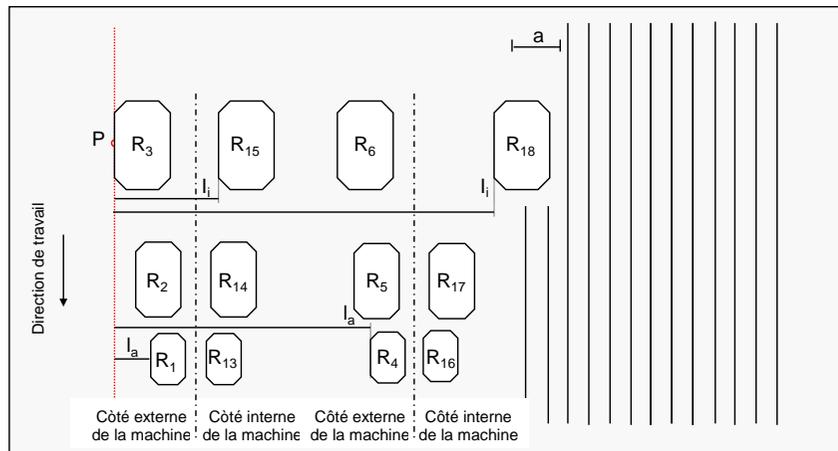


Fig. 44 : schéma pour l'acquisition de données « surfaces foulées et passage multiple ».