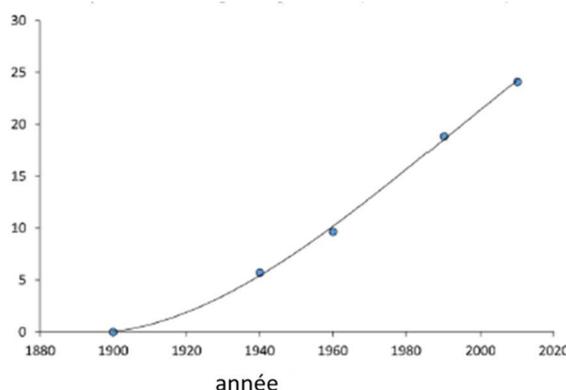


ENGINS FORESTIERS A PNEUS ET PRESERVATION PHYSIQUE DES SOLS

Note de synthèse

La préservation de l'intégrité physique des sols forestiers est un objectif prioritaire dans le cadre de la gestion durable des ressources forestières. La question fondamentale qui se pose est quels sont les engins les moins impactants, tout en assurant une bonne performance économique indispensable au maintien et au développement des activités forestières ? En effet, la circulation des véhicules exerce inévitablement des contraintes verticales et horizontales ainsi que des contraintes de cisaillement sur le sol (Keller et al., 2013) dont le principal résultat est le tassement du sol. Ses conséquences sur le fonctionnement du sol ont été étudiées par de nombreux auteurs et il affecte les fonctions clés du sol, notamment l'écoulement de l'eau et l'aération, le cycle des éléments nutritifs, la production agricole et forestière et les habitats des organismes du sol (Wilpert et Schäffer ; 2006, Goutal et al., 2013 ; Keller et al., 2019, Mariotti et al, 2020). Bien que le phénomène général de tassement soit connu des forestiers, l'importance du tassement des horizons pédologiques profonds l'est beaucoup moins. En effet, le tassement du sous-sol (profondeur > 25 cm) est d'une grande importance car il a des impacts négatifs sur le développement des racines, l'infiltration de l'eau et la capacité de stockage de l'eau du sous-sol, entraînant des pertes de production et favorisant aussi les crues (Keller et al., 2019).



Perte de rétention en eau (mm d'eau/m²) entre 25 et 100 cm de profondeur causée par l'augmentation du poids des engins agricoles en Suède ; la charge à la roue d'une moissonneuse passant de 1.5t en 1960 à 9t aujourd'hui

Dans les sols arables, le tassement du sous-sol a été signalé comme étant persistant (Håkansson et Reeder, 1994 ; Peng et Horn, 2008 ; Berisso et al., 2012) et il peut être observé dans les sols forestiers jusqu'à une profondeur de 80 cm (Lüscher et al., 2019).

Ainsi, il convient de :

- **Préserver les sols forestiers en ne circulant que sur les cloisonnements (guide Prosol 2009)**
- **Préserver la praticabilité des cloisonnements à long terme (guides Prosol 2009 et Pratic'Sols 2017)**
Cet objectif est atteint en circulant sur les cloisonnements quand les conditions de portance (et donc d'humidité) le permettent. Cela a comme conséquence directe que les périodes de récolte des bois sont limitées dans certaines régions.
Se posent inévitablement deux questions : quelle(s) activité(s) pour les entreprises de récolte durant les périodes d'arrêt et comment assurer l'approvisionnement des unités de transformation de la filière forêt-bois ?

Par ailleurs, la diminution de la pression exercée par les engins sur le sol (cf. ci-dessous) permet de limiter les risques d'orniérage et de compactage du sous-sol. Les capacités de drainage du sol sont ainsi préservées, garants d'une meilleure praticabilité des cloisonnements.

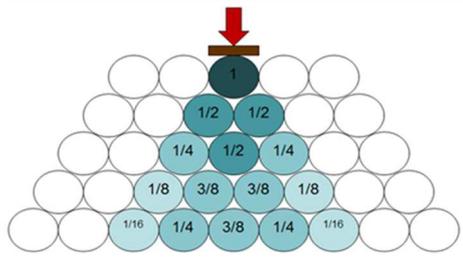
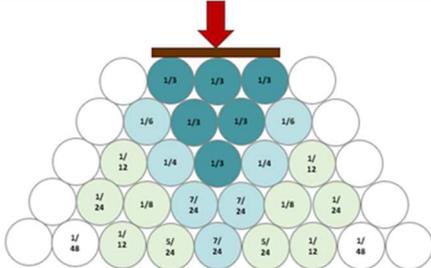
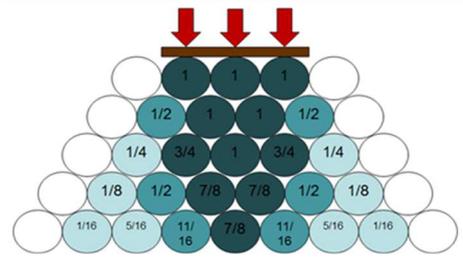
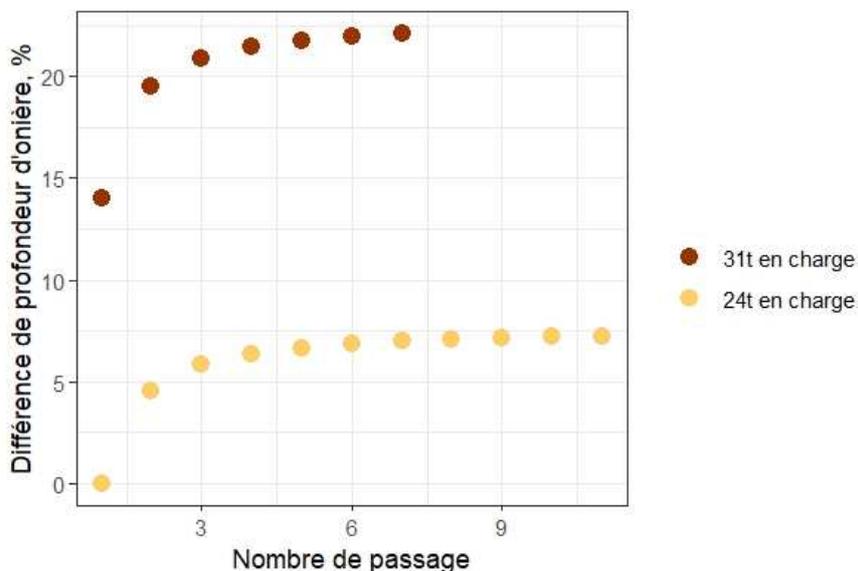
Deux mesures pour réduire la pression exercée sur le sol	
<p>La charge à la roue est représentée par une flèche rouge dans les graphiques suivants, la taille des pneumatiques est représentée par le rectangle marron à la surface du sol (plus le pneumatique est large plus la surface de contact avec le sol augmente et plus la pression diminue). Le sol est représenté par des billes qui se touchent. Ce modèle fait l'hypothèse que la pression ressentie par chaque particule de sol (1 bille) est répartie de manière égale entre les deux particules de sol sous-jacentes. Cette hypothèse est vérifiée dans de nombreuses situations et permet de simplifier et rendre accessible les équations de distribution des pressions dans le sol.</p>	
 <p>La charge à la roue est faible et la surface de contact aussi. On a une pression de 1 sur la particule de sol située sous la roue. La 5^{ème} particule de sol en descendant dans le sol subie une pression de 3/8^{ème}, soit 37,5 % de la pression initiale.</p>	 <p>La charge à la roue est restée la même, mais la surface de contact a triplé. La pression subie par les premières particules de sol n'est plus que de 1/3 car cette fois-ci 3 particules de sol la subissent. La 5^{ème} particule de sol en descendant dans le sol subie une pression de 7/24^{ème}, soit 29% de la pression initiale</p>
 <p>Dans ce scénario, on triple la charge à la roue. La pression subie par les premières particules de sol est toujours de 1 mais cette fois-ci 3 particules de sol la subissent. La 5^{ème} particule de sol en descendant dans le sol subie une pression de 7/8^{ème}, soit 87,5 % de la pression initiale.</p>	<p>Conclusions pour diminuer la pression exercée sur le sol :</p> <ol style="list-style-type: none"> 1) Il faut en priorité réduire la charge à la roue. En effet, plus elle est élevée, plus les contraintes exercées par les engins atteignent les couches profondes du sol, (Schønning et al., 2012). Or la tendance observée dans le secteur forestier, comme en agriculture, est une augmentation globale de la masse des engins (Nordfjell, 2019). 2) A masse constante, augmenter le nombre de roues et opter pour des pneumatiques plus larges et des roues plus grandes ou la pose de tracks, ceci afin d'augmenter la surface de contact au sol et ainsi réduire la pression par unité de surface. <p>Ces deux critères (charge à la roue et pression) sont utilisés par le centre technique KWF en Allemagne pour évaluer les machines forestières.</p>

Illustration théorique de l'effet du poids de l'engin et de la taille de ses pneumatiques.

Remarques sur les charges à la roue : Schønning et al. (2012) ont proposé la "règle du 50-50" pour les agriculteurs : "Lorsque la teneur en eau est proche de la capacité des champs, la circulation sur le sol agricole ne doit pas exercer de contraintes verticales supérieures à 50 kPa à des profondeurs supérieures à 50 cm." Si on applique cette règle aux sols forestiers, la charge à la roue des porteurs ne devrait pas dépasser environ 3 à 3,5 tonnes par roue (Keller, 2018). L'institut technique allemand KWF considère, pour évaluer les porteurs, que l'impact d'une charge à la roue < 3,5 tonnes est faible et celle ≥ 4,5 élevée (Ruch, 2018).

Ainsi, un porteur de masse moyenne, voir exemple ci-dessous, même s'il doit effectuer plus de passages sur un même cloisonnement pour sortir la même quantité de bois, impactera moins le cloisonnement qu'un gros porteur. Cependant, sa productivité est également plus faible, ce qui a des conséquences directes sur les coûts de mobilisation des bois.



Différence de profondeur d'ornièrè prédite par le modèle mécaniste SoilFlex (Keller et al. 2007) en % de la profondeur d'ornièrè la plus faible du jeu de données (i.e. premier passage du porteur le plus léger des deux) pour un gros porteur (31t en charge, 18t à vide, charge à la roue maximale de 5t) et un porteur moyen (24t en charge, 16t à vide, charge à la roue maximale de 3.5t) pour un même tonnage de bois sorti du cloisonnement (11 passages pour le porteur moyen contre 7 pour le porteur lourd). La profondeur d'ornièrè est en lien avec la capacité de drainage du cloisonnement, plus elle est importante moins le cloisonnement est capable de drainer l'eau de pluie (Frey et al. 2009), il sera ainsi moins souvent et moins longtemps praticable.

Il est aussi à noter que ce sont les engins de débardage qui présentent les charges à la roue les plus élevées.

Les engins de récolte vendus en France (synthèse sur les années 2018, 2019 et 2020, FCBA)

Débusqueurs : en moyenne 49 engins vendus par an dont 98% de 4 roues, les 6 roues étant peu répandus pour l'instant. 29% sont montés avec des pneumatiques de plus de 700 mm de large.

- Débusqueur à câble uniquement 30% des ventes en moyenne (mais plus que 17% en 2020)
- Débusqueur à pince 16% (23 % en 2020)
- Débusqueur à grue 54% (60% en 2020)

Leur masse est très variable et dépend des équipements choisis (grue, treuil...), de 8 tonnes à vide pour les petits débusqueurs à 20 tonnes pour les très gros.

A titre d'exemple, un débusqueur d'une masse à vide de 18 tonnes avec une charge de 3,5 tonnes sur les roues arrière a une charge à la roue, compte tenu des reports de charge, d'environ 7 tonnes. Pour un 16 tonnes, elle est d'environ 6,5 tonnes et environ 6 tonnes pour un débusqueur de 15 tonnes.

En 2020, la répartition selon la puissance était la suivante sur 48 ventes :

Appellation	Puissance	Part de marché	Part des pneumatiques > 700 mm de large	Types
Très gros	200 ch et +	77%	35%	14% à câble uniquement, 25% à pince et 61% à grue
Gros	175 à 199 ch	10%	0%	40% à pince et 60% à grue
Moyen	125 à 174 ch	13%	-	50% à câble uniquement et 50% à grue
Petit	Moins de 125 ch	0%	-	

Porteurs : en moyenne 130 engins vendus par an, presque tous en 8 roues (99%) très souvent équipés en pneumatiques de plus de 700 mm de large

Appellation	Capacité de charge	Part de marché	Charge à la roue moyenne sur les roues arrière en charge*
Très grande	18 tonnes et plus	3%	6,7 tonnes
Grande	14 à 17 tonnes	52% (dont environ 2/3 de 14 tonnes)	5,3 tonnes
Moyenne	11 à 13 tonnes	41%	4,6 tonnes
Petite	5 à 10 tonnes	4%	< 4,5 tonnes
Très petite	moins de 5 tonnes	1%	

* d'après données constructeurs et une répartition de la masse en charge de 65% sur les roues arrière

Machines de bûcheronnage : en moyenne 96 par an, dont 63% en 8 roues, masse variable jusqu'à 24-26 tonnes pour les machines les plus puissantes. La charge à la roue (à vide) est directement liée au nombre de roues : pour une machine de 18 tonnes à vide elle est en moyenne de 3 tonnes en 6 roues et de 2,25 tonnes en 8 roues.

Appellation	Capacité de charge	Part de marché
Très grande	281 à 350 ch et 751 à 950 mm de coupe	29%
Grande	211 à 280 CV et 600 à 750 mm de coupe	43%
Moyenne	160 à 210 CV et 501 à 599 mm de coupe	1%
Petite	160 à 210 CV et 400 à 500 mm de coupe	0%
Très petite	100 à 159 ch et moins de 400 mm de coupe	1%

Philippe RUCH (FCBA) Noémie Pousse (ONF RDI)

24 mai 2022

Bibliographie :

Berisso, F.E., Schjønning, P., Keller, T., Lamandé, M., Etana, A., de Jonge, L.W., Iversen, B.V., Arvidsson, J., Forman, J., 2012. Persistent effects of subsoil compaction on pore characteristics and functions in a loamy soil. *Soil Tillage Res.* 122, 42–51.

Bonnemazou M, Cacot E, Ruch P. 2019. Les ventes d'engins forestiers en France en 2018 : principaux résultats. FCBA-Info 2019_juin_14. 1-6. <https://www.fcba.fr/sites/default/files/fcbainfo-2019-14-ventes-engins-forestiers-france-2018-resultats-bonnemazou-ruch-cacot.pdf>

Frey B, Kremer J, Rüdert A, Sciacca S, Matthies D, Lüscher P. 2009. Compaction of forest soils with heavy logging machinery affects soil bacterial community structure. *European Journal of Soil Biology* 45 (4): 312-20. <https://doi.org/10.1016/j.ejsobi.2009.05.006>.

- Goutal N, Renault P, Ranger J. 2013. Forwarder traffic impacted over at least four years soil air composition of two forest soils in northeast France. *Geoderma* 193–194, 29–40. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2012.10.012>
- Håkansson, I., Reeder, R.C., 1994. Subsoil compaction by vehicles with high axle load extent, persistence and crop response. *Soil Tillage Res.* 29, 277–304.
- Horn, R., Fleige, H., 2003. A method for assessing the impact of load on mechanical stability and on physical properties of soils. *Soil Tillage Res.* 73, 89–99.
- Johnson, C.E., Burt, E.C., 1990. A method of predicting soil stress state under tires. *Trans. ASAE* 33: 713-717.
- Keller T, Sandin M, Colombi T, Horn R, Or D. 2019. Historical increase in agricultural machinery weights enhanced soil stress levels and adversely affected soil functioning. *Soil and Tillage Research* 194, 104293. <https://doi.org/10.1016/j.still.2019.104293>
- Keller T., Défossez P., Weisskopf P., Arvidsson J. & Richard G. 2007. SoilFlex: A model for prediction of soil stresses and soil compaction due to agricultural field traffic including a synthesis of analytical approaches. *Soil & Tillage Research*, 93:391-411.
- Keller, T, Lamandé M, Peth S, Berli M, Delenne JY, Baumgarten W. et al, 2013. An interdisciplinary approach towards improved understanding of soil deformation during compaction. *Soil Tillage Research.* 128:61-80. Doi:10.1016/j.still.2012.10.004
- Keller, T, Ruiz S, Stettler M, Berli M. 2016. Determining soil stress beneath a tire: measurements and simulations. *Soil Science Society of America Journal.* 80:541-533. Doi:10.2136/sssaj2015.07.0252
- Lüscher P, Frutig F, Sciacca S, Spjevak S, Thees O. 2019. Protection physique des sols en forêt. Protection des sols lors de l'utilisation d'engins forestiers. Notice pour le praticien n°45. WSL. 12p.
- Mariotti B., Hoshikab Y, Cambia M., Marra E., Feng Z, Paoletti E., Marchia E., 2020. Vehicle-induced compaction of forest soil affects plant morphological and physiological attributes: A meta-analysis. *Elsevier Forest Ecology and Management* 462 (2020) 118004 <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2020.118004>
- Nordfjell T, Öhman E, Lindroos O, Ager B. 2019. The technical development of forwarders in Sweden between 1962 and 2012 and of sales between 1975 and 2017. *International journal of forest engineering.* 30:1, 1-13, doi 10.1080/14942119.2019.1591074
- Peng, X., Horn, R., 2008. Time-dependent, anisotropic pore structure and soil strength in a 10-year period after intensive tractor wheeling under conservation and conventional tillage. *J. Plant Nutr. Soil Sci.* 171, 936–944.
- Ruch, P., Montagny X., Sandin M., Stettler M., Keller T. 2018. Ground pressure metrics and stress distribution at the tyre- soil interface for forwarders. Efforts, Deliverable D1.2. – Database and models for soil type specific trafficability, 14-23.
- Schjønning, P., Lamandé, M., Keller, T., Pedersen, J., Stettler, M., 2012. Rules of thumb for minimizing subsoil compaction. *Soil Use Manage.* 28, 378–393.
- Schjønning, P., van den Akker, J.J.H., Keller, T., Greve, M.H., Lamandé, M., Simojoki, A., Stettler, M., Arvidsson, J., Breuning-Madsen, H., 2015. Driver-Pressure-State-Impact-Response (DPSIR) analysis and risk assessment for soil compaction – a European perspective. *Adv. Agron.* 133, 183–237.
- Wilpert K, von Schäffer J, 2006. Ecological effects of soil compaction and initial recovery dynamics: a preliminary study. *Eur. J. For. Res.* 125, 129–138. <https://doi.org/10.1007/s10342-005-0108-0>
- Zink, A., Fleige, H., Horn, R., 2010. Load risks of subsoil compaction and depths of stress propagation in arable Luvisols. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 74, 1733–1742.