

FORÊT • NATURE

OUTILS POUR UNE GESTION
RÉSILIENTE DES ESPACES NATURELS

Tiré à part de la revue **Forêt.Nature**

La reproduction ou la mise en ligne totale ou partielle des textes
et des illustrations est soumise à l'autorisation de la rédaction

foretnature.be

Rédaction : Rue de la Plaine 9, B-6900 Marche. info@foretnature.be. T +32 (0)84 22 35 70

Abonnement à la revue Forêt.Nature :
librairie.foretnature.be

Abonnez-vous gratuitement à Forêt.Mail et Forest.News :
foretnature.be

Retrouvez les anciens articles de la revue
et d'autres ressources : **foretnature.be**



À PROPOS DE LA PRESSION EXERCÉE PAR LES PNEUS, CHENILLES ET SABOTS

MARIE-AMÉLIE DE PAUL – MICHEL BAILLY

La mécanisation fait aujourd'hui partie du quotidien de l'exploitation forestière. L'apport non négligeable de rentabilité et de confort de travail que celle-ci procure n'est d'ailleurs plus à démontrer. Cependant, la circulation d'engins de plus en plus lourds amène de nombreux gestionnaires à se poser la question de leur impact sur les sols forestiers.

Lors de deux précédents articles, nous avons identifié la compaction des sols comme l'impact le plus dommageable de l'exploitation forestière. Le phénomène et les facteurs d'apparition ont été exposés¹ et ses conséquences – productivité, régénération, biodiversité, état sanitaire – présentées.²

Ayant expliqué le principe du phénomène de la compaction et démontré son côté dommageable, nous nous attachons ici à l'analyse des pressions que peuvent développer les engins d'exploitation.

LA PROBLÉMATIQUE

Calculer précisément les pressions exercées sur le sol par un engin d'exploitation et pouvoir ensuite les interpréter en termes d'impact (compaction, par exemple) sont deux choses qui peuvent paraître simples au premier abord mais qui,



Il existe des profils de pneus plus ou moins agressifs pour les sols. Les crampons les plus marqués permettent une meilleure adhérence mais participent à la détérioration du sol.

Enfin, il apparaît également que la seule connaissance de la pression de contact localisée ne suffit pas à déterminer l'impact réel en termes de compaction : l'étendue de la surface soumise à la contrainte tient en effet une place fondamentale.

Pour faciliter la compréhension de ce sujet délicat, les lignes qui suivent vont s'attacher à expliquer les principaux facteurs jouant sur la pression exercée par les engins et leur impact sur la compaction des sols. Une synthèse et quelques réflexions clôtureront cette analyse.

LA PRESSION EXERCÉE PAR LES PNEUS

aujourd'hui encore, restent du domaine de la haute voltige.

Ce constat est particulièrement vrai pour les engins munis de pneus car la surface de contact entre le sol et les pneus évolue constamment de par la nature élastique de ceux-ci. À l'opposé, les chenilles et sabots des chevaux sont rigides et présentent avec le sol une surface de contact plus constante. Cette simplicité apparente peut néanmoins, et dans certains cas, être démentie par les mesures prises sur le terrain.

De plus, outre l'évolution de la surface de contact, les pneumatiques, chenilles et autres sabots supportent des charges variables qui sont soit dues à l'évolution de la masse totale ou simplement dues à la modification du centre de gravité pendant les manœuvres.

Évaluer les pressions exercées sur le sol par les pneus d'un engin est une opération très complexe. Car, s'il s'agit théoriquement d'un rapport de masse sur une surface – la masse totale de l'engin divisée par la surface de contact de l'ensemble des pneus –, il apparaît que ces deux variables évoluent régulièrement voire constamment. En effet, un porteur par exemple, voit sa masse passer du simple au double en l'espace de quelques minutes lors d'un chargement. Ses pneus s'écrasent alors, faisant évoluer sensiblement la surface de contact. La modification de ces deux facteurs (surface de contact et masse) induit une évolution de la pression instantanée très difficile à prévoir.

Pourtant, certains fabricants de machines déterminent les pressions appliquées au sol

dans les fiches techniques de leurs engins : ce sont en réalité des pressions théoriques (minimales) définies en divisant la charge de l'engin par la surface de contact théorique entre le pneu et le sol, pour une machine à l'arrêt. Celle-ci est calculée en considérant la trace du pneu comme un rectangle ou un ovale dont le petit côté est la largeur du pneu, et le grand, la portion de la bande de roulement en contact avec le sol. Dans la réalité, la répartition des pressions exercées sur le sol est très hétérogène, elles peuvent en effet être beaucoup plus élevées à certains endroits (sous les barrettes des pneus, par exemple).

C'est ainsi que ROTARU annonce³ : « À cause des nervures (crampons), et en fonction d'autres données de fabrication, un pneu présenté comme exerçant $1,8 \text{ kg/cm}^2$ peut exercer des pressions localisées pouvant atteindre 12 kg/cm^2 , voire davantage sur terrain sec ». La charge ne reposant dans ce cas que sur les barrettes.

L'origine de la différence entre pression théorique et pression réelle tient à de nombreux facteurs dont la surface de contact, les caractéristiques du pneu, le sol, la pression de gonflage ou encore la charge et l'activité du véhicule. Nous proposons de les passer en revue ici.

La surface de contact

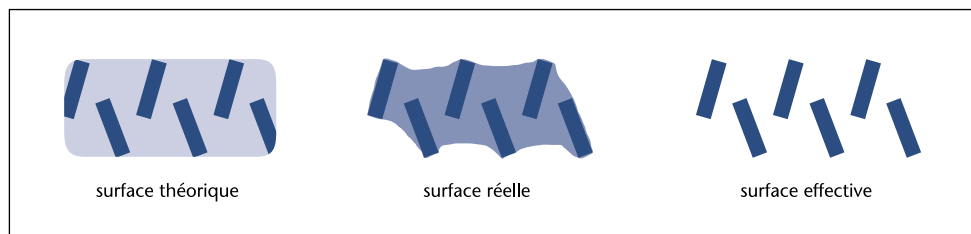
En première approche, il y a lieu de définir la partie du pneu réellement en contact avec le sol et sur laquelle repose la masse de l'engin. On distingue trois surfaces⁴ (figure 1) :

- la surface théorique, qui correspond à une surface de forme plus ou moins rectangulaire, calculable à partir des dimensions et caractéristiques du pneu ainsi que de la charge ;
- la surface réelle qui correspond à la trace réelle de l'empreinte du pneu sur le sol ;
- la surface effective qui ne retient que les portions plus marquées correspondant aux crampons.

La surface théorique définit une valeur maximale qui n'est quasiment jamais rencontrée sur le terrain. C'est par contre celle-ci qui est utilisée par les constructeurs pour définir les pressions des engins dans leurs catalogues.

En réalité, les pressions verticales se distribuent globalement sur la surface réelle d'empreinte et, de façon plus marquée, sur la surface effective. Généralement les pressions appliquées par les surfaces réelles restent assez faibles alors que les pressions effectives sont toujours beaucoup

Figure 1 – Les trois surfaces considérées pour évaluer les pressions appliquées sur le sol.⁴



Charge (kg)	Nombre de barrettes impliquées	Surface réelle (cm ²)	Surface effective (cm ²)	Rapport (%)
1 010	8	3 193	700	22
1 720	8	3 333	720	22
2 400	8	3 544	792	22

Tableau 1 – Surfaces réelles et effectives d'un pneu gonflé à 1,3 bar sur sol meuble et pour différentes charges.⁴

plus (trop) élevées. Et ce sont les pressions relevées sous les crampons, donc sur la surface effective, qui interviennent dans le poinçonnement du sol et qui peuvent se répercuter très profondément.

À titre d'illustration, le tableau 1 donne les surfaces réelle et effective d'un pneu gonflé à 1,3 bar sur sol meuble⁴. On remarque que pour différentes charges, la surface effective est systématiquement de l'ordre du cinquième de la surface réelle.

Ce qui signifie que, dans certaines conditions (sol rigide et pression de gonflage élevée, par exemple), la masse de l'engin ne repose que sur les barrettes des pneus, soit un cinquième à peine de la surface d'empreinte. Dans d'autres cas cependant (sol meuble, pression de gonflage adaptée) les surfaces entre les crampons participent de manière non négligeable à la distribution des pressions.

Répartition localisée de la pression

Partant de la surface réelle, il est possible de poursuivre l'investigation pour observer comment se distribue la pression sur l'ensemble de celle-ci. Plus particulièrement, l'observation se porte sur la répartition des pressions sous et entre les crampons ainsi que suivant une ligne partant

du centre de la bande de roulage vers l'extérieur. C'est ce qu'une récente étude⁵, publiée en mai 2004, s'est attachée à faire.

Pour ce faire, les auteurs ont mesuré les contraintes exercées sur un sol argileux par un pneu de porteur en mouvement. Il est donc ici question de pressions dynamiques. Différents capteurs placés sous et entre les crampons d'un pneu de 600 mm de large relèvent les pressions exercées sur le sol pendant le cheminement du porteur qui évolue à la vitesse constante de 0,15 mètre par seconde.

Les contraintes exercées sur le sol sont mesurées dans quatre scénarios différents résultant de la combinaison d'une pression de gonflage (1 ou 2,4 bar*) et d'une charge à la roue (2 300 ou 4 000 kg). Chaque combinaison étant susceptible de provoquer une réaction d'écrasement différente des pneus et donc une répartition de charge différente.

Les pressions relevées dans chaque scénario permettent la réalisation de graphiques qui se présentent de la manière suivante : pour une pression de gonflage et une charge définie, l'évolution des pressions relevées par les capteurs est donnée selon l'angle d'attaque avec le sol. La figure 2 illustre le relevé effectué avec 2,4 bar de pression de gonflage et une charge à la roue de 4 000 kg.

* 1 bar = 1 kg/cm².

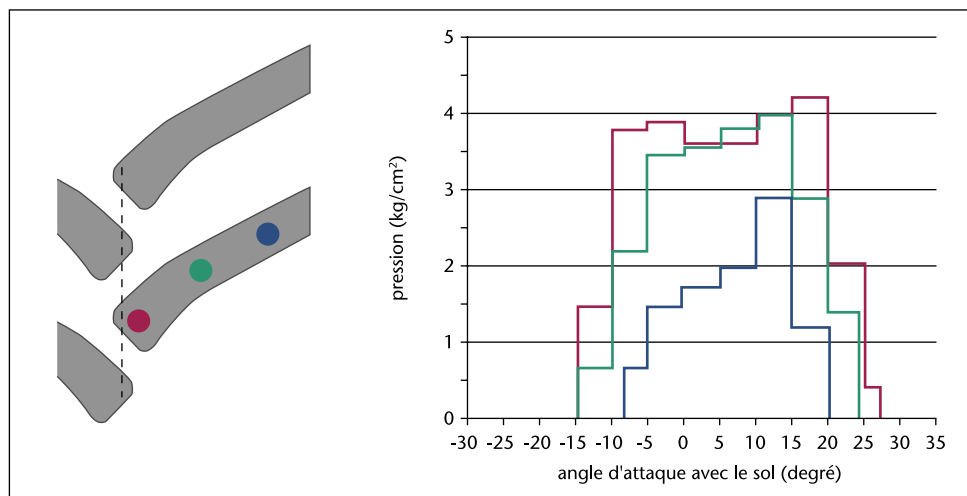


Figure 2 – Graphique construit sur base des pressions relevées par les capteurs situés sous les crampons pour une charge de 4 000 kg et une pression de gonflage du pneu de 2,4 bar.⁵

Les enseignements de la figure 2 sont nombreux et illustrent parfaitement qu'au niveau même des crampons, on relève une très nette différence de pressions du centre vers l'extérieur de la bande de roulage. En observant le tableau 2, dressant la synthèse de l'expérience, on peut observer pour les différentes modalités de charge et de pression de gonflage, les écarts existant entre les pressions maximales relevées sous les crampons et entre ceux-ci : des rapports de 1,60 à plus de 37 (!) sont enregistrés démontrant l'extrême hétérogénéité de la répartition des pressions.

La notion de surface effective prend alors tout son sens.

La pression de gonflage

On a remarqué dans l'exemple ci-dessus que la pression de gonflage tient une place importante. Il suffit pour cela de se référer au tableau 2 qui démontre que, toute chose restant égale, la pression de gonflage joue sur la pression au sol, au niveau des crampons par exemple.

Il est également important de couper court à la rumeur trop souvent évoquée, déclai-

Tableau 2 – Pressions maximales relevées entre et sous les crampons pour les différentes combinaisons de poids et de pression de gonflage.⁵

Poids (tonne)	Pression de gonflage (bar)	Maximum sous les crampons (kg/cm ²)	Maximum entre les crampons (kg/cm ²)	Rapport
2,3	1,0	5,8	0,8	7,3
	2,4	7,5	0,2	37,5
4,0	1,0	8,5	5,0	1,7
	2,4	5,0	3,2	1,6

Type	Marque et modèle	Organes de roulement	Dimensions des chaînes ou des pneus avec pression de gonflage	Poids
Abatteuse	IMPEX 1880 « Hannibal »	2 chenilles	600 mm de large 4 600 mm de long	45 tonnes
Abatteuse	IMPEX 1650 T « Königstiger »	2 chenilles	600 mm de large 4 000 mm de long	30 tonnes
Abatteuse	Valmet 911 « Snake »	4 chenilles	500 mm de large 2 500 mm de long	20 tonnes
Abatteuse	Caterpillar 580	4 roues à l'avant 2 roues à l'arrière	Avant : 600 mm Arrière : 700 mm Gonflage : 2 bar	17,5 tonnes
Porteur	Timberjack 810	8 roues	Toutes : 600 mm Gonflage : 2 bar	10 tonnes
Débardeuse	HSM 904	4 roues	Toutes : 600 mm Gonflage : 2,5 bar	8,71 tonnes
Cheval	« Schwarzwälder »	4 sabots		0,65 tonnes

Tableau 3 – Différentes machines et cheval utilisés dans l'expérience de HORN et al.⁶

rant que la pression exercée sur le sol correspond à la pression de gonflage des pneus*. Cela peut dans certains cas s'avérer mais uniquement si l'on parle en termes de surface réelle et de valeur moyenne. Dès que l'on analyse les pressions de manière plus pointue, on se rend compte que cette affirmation est totalement inexacte (tableau 2). La rigidité des pneus forestiers empêche en effet l'exactitude de cette relation.

Généralement, les pressions moyennes appliquées par les surfaces réelles restent assez faibles et proches de la pression de gonflage, voire inférieures sur sols meubles alors que les pressions relevées sur les surfaces effectives sont beaucoup plus importantes.

Ainsi, sur sol meuble, un pneu gonflé à 0,8 bar et supportant une charge de

2 400 kg, peut exercer une pression moyenne de 0,64 kg/cm² mais une pression effective de 2,84 kg/cm². Ce même pneu, gonflé à 1,3 bar peut exercer une pression moyenne de 0,68 kg/cm² et une effective de 3,03 kg/cm². Sur sol rigide, et toujours à la pression de gonflage de 1,3 bar, la pression moyenne sera de 1,25 kg/cm² et celle effective sera de 6,42 kg/cm², soit cinq fois supérieure à la pression de gonflage.⁴

À noter que dans le cas présent, les pressions sont issues d'un chargement statique et non dynamique.

On peut dès lors affirmer que :

- quand la pression de gonflage augmente, les pressions appliquées sur le sol augmentent ;
- les pressions localisées peuvent être largement supérieures à la pression de gonflage.

C'est l'occasion d'ouvrir ici la question de la pression de gonflage sur chantier. Pour

* Les pressions de gonflage les plus fréquemment utilisées sont, pour les débardeuses, 1,7 à 2,3 bar et, pour les porteurs, 1,5 à 3 bar.

ce qui est des débardeuses et abatteuses, le respect des recommandations des constructeurs devrait suffire. Pour les porteurs, cependant, on peut se poser la question de la pression à choisir, la masse de l'engin évoluant au gré de ses chargements et déchargements, parfois du simple au double. Or, il apparaît clairement que des pneus sur-gonflés ou sous-gonflés engendrent des pressions beaucoup plus importantes ou hétérogènes. Dans le tableau 2, on peut observer pour chaque poids, l'effet d'un sous-gonflage (4,0 tonnes) ou du sur-gonflage (2,3 tonnes). On peut imaginer que le choix d'une pression de gonflage intermédiaire pourrait être l'option à prendre. Cela doit cependant être vérifié.

Le sol

Le comportement du sol à l'égard de la charge va jouer sur la surface de contact et dès lors sur la pression : on peut considérer que plus le sol est rigide, moins la surface effective est grande et plus la pression est forte. Ainsi, on a mesuré⁶ qu'un pneu donné supportant une charge de 2 400 kg, exerçait sur sol meuble une pression effective de 3,03 kg/cm², alors que sur sol rigide, celle-ci s'élevait à 6,42 kg/cm², le rapport de ces deux pressions étant égale à l'inverse du rapport des surfaces effectives respectives (792 cm² et 374 cm²).

Les mouvements et charges de l'engin

Sur chantier, le poids supporté au niveau des roues de l'engin varie sans cesse soit par une augmentation ou diminution de la charge, soit par un déplacement du centre de gravité. Ainsi, à chaque préhension de bois, une pression localisée supérieure à la pression moyenne est enregistrée. Et des faits similaires sont relevés lors des opérations d'abattage, c'est-à-dire que

tout départ de machine, préhension de bois ou changement brusque d'allure entraîne une pression localisée plus élevée sur le sol.⁶

LA PROBLÉMATIQUE DES ENGIN SUR CHENILLES ET DES CHEVAUX

Intuitivement, on pourrait penser que les surfaces de contact définies par ces organes sont plus constantes et que dès lors les pressions induites sur le sol sont moins variables que pour les pneumatiques. Les chenilles et sabots sont en effet quasi indéformables et ne subissent pas de modification au cours du temps. Il apparaît cependant que la question n'est pas aussi simple.

Afin d'illustrer concrètement nos propos et de fixer des ordres de grandeur, nous proposons ici quelques chiffres issus d'une recherche allemande⁶. Celle-ci a été menée dans une pessière de la Forêt Noire et a comparé l'influence, sur le sol forestier, du passage de six machines différentes et d'un cheval. Les machines et le cheval utilisés pour l'expérience sont repris dans le tableau 3, accompagnés de leurs principales caractéristiques. Il est important de préciser que les poids indiqués correspondent aux poids des machines pendant l'expérience. C'est-à-dire, avec une certaine quantité de carburant, d'huile...

Ici, des capteurs placés à 20 cm de profondeur relèvent les pressions exercées à cet endroit ainsi que les déplacements de sol induits lors du passage d'un engin. Les résultats enregistrés par les capteurs sont repris à la figure 3.

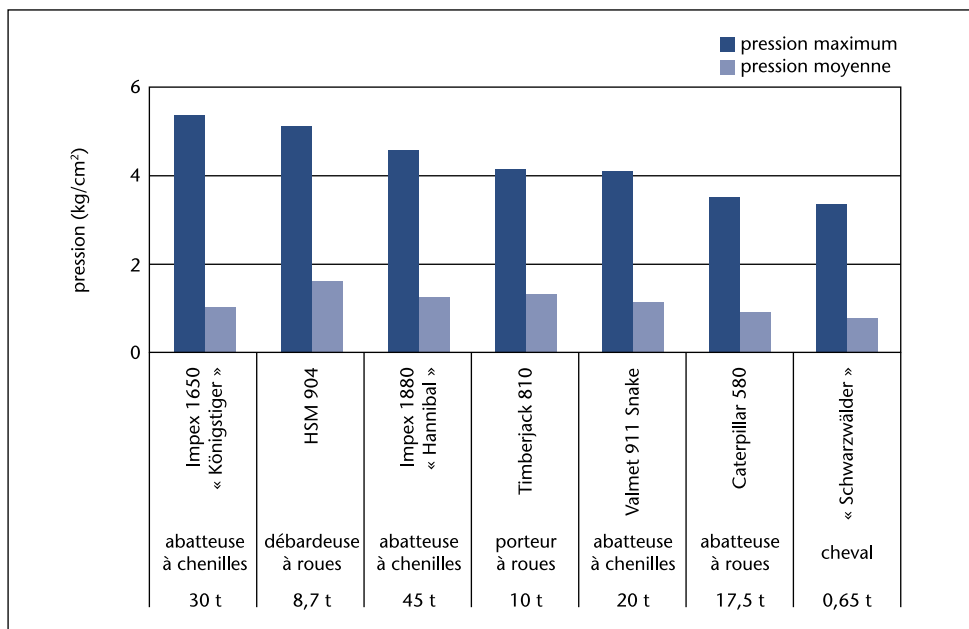


Figure 3 – Pressions moyennes et maximales enregistrées sous les différents véhicules à 20 cm de profondeur.⁶

Valmet 911.3 Snake, machine utilisée dans l'expérience de HORN et al.⁶



Selon ce graphe, la pression la plus élevée enregistrée à 20 cm de profondeur résulte du passage de l'Impex « Königstiger », un engin monté sur chenilles. Ce véhicule d'un poids de 30 tonnes a travaillé pour l'expérience selon un scénario typique d'abattage comprenant l'arrivée, l'abattage mécanique, l'ébranchage et le billonnage du tronc ainsi que le départ de l'engin. La valeur théorique de pression que l'on pouvait attendre de cet engin est exprimée par le rapport entre son poids (30 000 kg) et la surface de ses deux chenilles (60 cm x 400 cm x 2 = 55 200 cm²) soit 0,62 kg/cm². Or les valeurs maximales enregistrées par les capteurs ont été de plus de 5 kg/cm² (figure 3).

Les pressions mesurées pour « Hannibal » (45 tonnes) sont également proches des 5 kg/cm² alors que la pression théorique attendue ne devait pas dépasser les 0,81 kg/cm² (signalons au passage que cet engin a évolué sur une couche de 60 cm de rémanents).

Enfin, la pression maximale exercée par le cheval est enregistrée quand le sabot est exactement sur le capteur : à ce moment

elle atteint près de 3,5 kg/cm², alors que la pression théorique devrait avoisiner les 1,5 kg/cm².

Les différences relevées entre pressions théoriques et mesurées laissent perplexes puisqu'on atteint des rapports allant jusqu'à huit.

Pour les engins chenillés, la raison principale expliquant l'écart entre pression théorique et réelle est sans aucun doute l'hétérogénéité du terrain qui empêche que toute la chenille soit en contact avec le sol. Mais cet écart est aussi engendré par une modification de la répartition des charges due aux mouvements de l'engin et plus particulièrement de son bras. Lors de la préhension d'un arbre et des opérations d'abattage, d'écorçage et de billonnage, le centre de gravité de l'engin est déplacé engendrant des augmentations de pression ponctuelles. Si celles-ci sont fort importantes, on peut cependant imaginer qu'elles sont également fort localisées.

Pour ce qui est du cheval, sa posture au travail est différente de celle du cheval au

Traces laissées par le cheval lors des opérations de débusquage.



repos bien campé sur ses quatre membres. On imagine aisément que, tour à tour, chacun des membres exerce une pression plus importante au niveau du sol. De même, lors de son effort, la surface de contact des sabots du cheval est réduite, ceux-ci attaquant le sol suivant un angle indispensable à l'avancement de l'animal et de sa charge.

Les débardeuses sont munies de pneumatiques au profil agressif leur permettant d'exercer les tractions importantes que l'on attend d'elles.



L'IMPORTANCE DE LA SURFACE TOTALE DE CONTACT

Au-delà de la pression elle-même, il s'avère que l'impact sur le sol est largement influencé par la surface de contact totale. En d'autres mots, pour une pression au centimètre carré équivalente, les dégâts de compaction s'enregistrent à une plus grande profondeur si cette pression s'applique sur une surface plus importante. La manifestation concrète de ce phénomène est globalement résumée dans la figure 4. Il s'agit de la représentation de l'effet sur le sol de deux roues de taille différente mais chargées de sorte à exercer une pression au sol égale.

Sur base de cette figure⁷, plusieurs choses sont à relever :

- la pression réellement appliquée sur le sol ($1,4$ à $1,6 \text{ kg/cm}^2$) est plus élevée que la pression théorique de contact qui est de $1,04 \text{ kg/cm}^2$. C'est une conséquence de la répartition des charges développée plus haut. Certaines portions du pneu n'exerçant quasiment pas de pression, d'autres compensent en exerçant des pressions largement supérieures ;
- à pression de contact égale, les effets du pneu large s'enregistrent beaucoup plus profondément et de manière plus intense : la pression enregistrée sous ce pneu à 40 cm est de $0,93 \text{ kg/cm}^2$ alors que sous le pneu étroit, à cette même profondeur, la pression n'est que de $0,45 \text{ kg/cm}^2$.

Ce qui nous amène à la conclusion suivante : le fait d'utiliser des pneus larges protège le sol à condition de ne pas augmenter le poids de l'engin. Si le poids de l'engin aug-

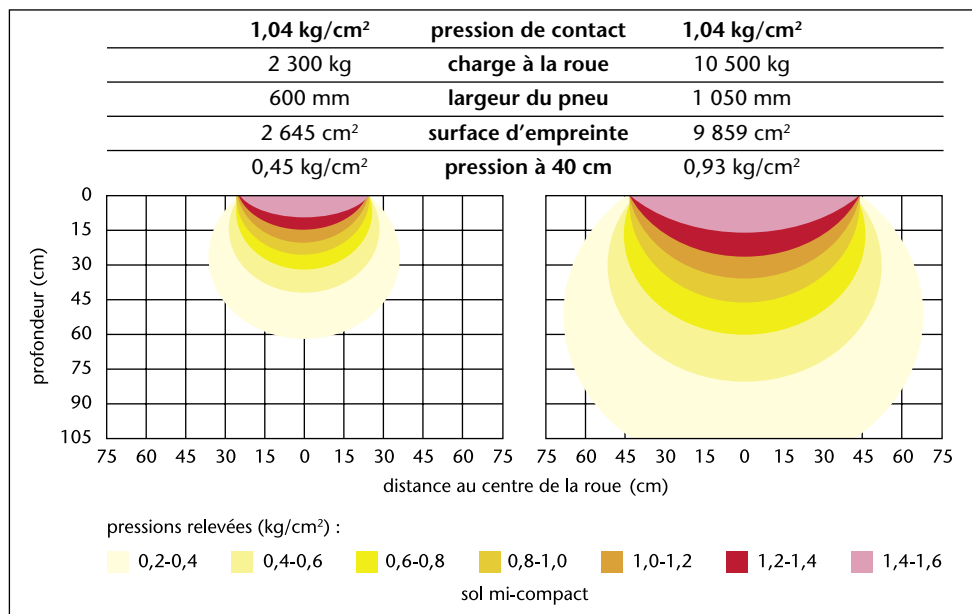


Figure 4 – Relevé des pressions exercées par deux pneus de dimension différente mais ayant une même pression de contact.⁷

mente également, les impacts en profondeurs peuvent être très importants.

CONCLUSION

La pression

De ce qui précède, nous pouvons tirer les conclusions suivantes :

- de manière générale, les pressions maximales exercées en conditions de travail dépassent largement les pressions calculées en divisant la masse par la surface théorique de contact. Ce constat est valable pour les engins à pneus et à chenilles comme pour les chevaux ;
- il est inexact de penser que seule la pression de gonflage intervient dans la contrainte exercée sur le sol. Les pressions localisées peuvent être jusqu'à près de dix fois supérieures à la pression de gonflage ;

- enfin, les engins chenillés peuvent exercer des pressions locales également fort importantes.

D'après l'ensemble des documents consultés, les pressions induites à la surface du sol lors du passage des différents outils d'exploitation se situent dans une fourchette de 0,4 à plus de 10 kg/cm². Les variations de valeur sont énormes car les caractéristiques des engins et du sol influencent très largement l'importance des pressions appliquées. La moyenne standard se situe cependant aux alentours des 3 kg/cm².

La compaction des sols

Seule, la pression exercée sur le sol ne donne que très peu d'indication quant à l'incidence en profondeur. Il est en effet démontré qu'à pression de contact identique, c'est la surface totale soumise à cette



Bogie de porteur muni de tracks (semi-chenilles).

pression qui détermine la profondeur de l'impact. Dès lors, il importe de ne pas considérer les pneus larges comme une condition suffisante à la préservation des sols : le recours à ceux-ci doit viser à réduire la pression de contact et non à permettre une augmentation de la masse totale.

Les outils

De façon générale, il apparaît que ce sont les porteurs et les débardeuses qui sont susceptibles de produire le plus de dégâts au sol, comparativement aux abatteuses munies de pneus ou de chenilles, et aux chevaux.

En effet, les débardeuses ont des pneus agressifs (crampons fort marqués) qui ont pour but d'offrir une bonne adhérence en toutes circonstances. Quant aux porteurs, ils ont des poids qui peuvent atteindre près de 40 tonnes.

En revanche, les abatteuses ont des crampons souvent moins agressifs puisqu'elles ne doivent pas développer d'efforts de traction importants ou sont montées sur chenilles.

Quant aux chevaux, ils ont un poids largement inférieur aux machines, 800 kg contre 10 à 40 tonnes mais une surface de contact avec le sol limitée. La pression des chevaux par unité de surface est dès lors relativement élevée (2 kg/cm² environ) et comparable à certains engins. Cependant, étant donné les petites surfaces en jeu, les impacts en profondeur sont inexistantes, ce qui permet de préserver au mieux nos sols forestiers. C'est pour cette raison que l'usage du cheval en exploitation forestière occasionne beaucoup moins de dégâts au sol même si la pression de contact est comparable voire supérieure à celle d'une machine.

Sachant que les machines sont devenues indispensables en forêt, il est nécessaire de les équiper au mieux afin de réduire les pressions exercées sur le sol et de protéger ainsi la productivité du peuplement et son pouvoir de régénération. Pour ce faire, il est impératif d'éviter les gammes de machines trop lourdes et le chargement excessif des porteurs. Il est également recommandé d'utiliser de préférence des machines munies d'un dispositif permettant de répartir les charges sur toutes les roues de manière constante en toutes circonstances et de les équiper de pneus au profil peu agressif gonflés à une pression adaptée.

Il est également possible d'équiper les deux pneus d'un bogie (roues montées sur balancier) de tracks, également appelés semi-chenilles. Outre le fait d'améliorer l'adhérence au sol, ce dispositif permet d'augmenter la surface de contact et de réduire de 30 à 40 % la pression moyenne exercée sur le sol.⁸⁻⁹

Enfin, il existe des logiciels qui permettent de juger les possibilités de faire circuler un engin donné sur un sol forestier donné¹⁰. Ces logiciels sont sans nul doute de formidables outils de préventions à développer dans l'avenir. ■

REMERCIEMENTS

Nous remercions Monsieur Michel Bartoli pour la relecture attentive de cet article.

BIBLIOGRAPHIE

¹ DE PAUL M.-A., BAILLY M. [2005]. La compaction des sols forestiers, définition et

principes du phénomène. *Forêt Wallonne* 76 : 39-47.

² DE PAUL M.-A., BAILLY M. [2005]. Effet de la compaction des sols forestiers. *Forêt Wallonne* 76 : 48-57.

³ ROTARU C. [1985]. Les phénomènes de tassement du sol forestier dus à l'exploitation mécanisée du bois. *Revue Forestière Française* 37(5) : 359-370.

⁴ ABEELS J. [1995]. Les engins en Forêt. *Forêt Wallonne* 23 : 9-12.

⁵ JUN H., WAY T.R., LÖFGREN B., LANDSTRÖM M., BAILEY A.C., BURT E.C., McDONALD T.P. [2004]. Dynamic load and inflation pressure effects on contact pressures of a forestry forwarder tire. *Journal of Terramechanics* 41 : 209-222.

⁶ HORN R., VOSSBRINK J., BECKER S. [2004]. Modern forestry vehicles and their impacts on soil physical properties. *Soil & Tillage Research* 79 : 207-219.

⁷ DISERENS E., SPIESS E. [2004]. *Interactions entre train de roulement et sol en grandes cultures*. Rapports de la FAT n° 613, 16 p.

⁸ CACOT E., PISCHEDDA D. [2005]. Récolte des bois et respect du sol : un dialogue à développer entre les acteurs. *Rendez-Vous Techniques* 8 : 36-43.

⁹ Fiche technique du porteur Timberjack 1710 D.

¹⁰ LAMANDÉ M., RANGER J., LEFÈVRE Y. [2005]. *Effets de l'exploitation forestière sur la qualité des sols*. ONF, Les dossiers forestiers n° 15, 131 p.

MARIE-AMÉLIE DE PAUL

m.depaul@foretwallonne.be

MICHEL BAILLY

m.bailly@foretwallonne.be

Forêt Wallonne asbl

Croix du Sud, 2 bte 9

B-1348 Louvain-la-Neuve