

1. Nous sommes toujours dans la 4ème partie et nous allons entamer la 2ème sous-partie.
2. Cette deuxième sous-partie explique les facteurs de sensibilité des sols au tassement
3. Pour comprendre la sensibilité des sols au tassement, il est nécessaire de comprendre les interactions entre les machines et les sols. En effet, le risque de tassement dépend des caractéristiques des engins et des propriétés des sols. La machine exerce une force principalement verticale sur le sol, la **pression** est la masse ou charge exercée sur une roue, divisée par la surface de contact entre la roue et le sol. Si la masse de l'engin est répartie de manière homogène, la charge à la roue est égale au poids de l'engin divisé par le nombre de roues, mais ce cas est rare, on considère donc la charge à la roue maximale. Sur le schéma, la charge à la roue est représentée par une flèche rouge, la surface de contact avec le sol est représentée par le rectangle marron. 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. Dans le cas présenté ici, qui sera notre référence par la suite, une pression égale à 1 est exercée sur la particule de sol située sous l'axe de la roue. La 5^{ème} particule, à la verticale de la pression exercée par la roue, subit une pression de $3/8^{\text{ème}}$, soit 37,5 % de la pression initiale.
4. Le cas référence que nous venons d'aborder est à gauche ici, pour rappel il correspond à une pression exercée sur la 5ème particule, équivalente à 37,5 % de la pression initiale. A droite, la charge à la roue est restée la même, mais la surface de contact a triplé. La pression subie par la première couche de particules n'est plus que de $1/3$ car cette fois-ci la pression est répartie sur trois particules au lieu d'une. La 5^{ème} particule de sol à la verticale de la pression subit une pression de $7/24^{\text{ème}}$, soit 29% de la pression initiale. En conclusion, augmenter la surface de contact entre la roue et le sol est efficace pour diminuer les impacts au sol.
5. Dans ce nouveau scénario, nous triplons la charge à la roue. La pression subie par la première couche de particules de sol est de 1 mais cette fois-ci trois particules la subissent. La 5^{ème} particule de sol à la verticale de la pression, subit une pression de $7/8^{\text{ème}}$, soit 87,5 % de la pression initiale. Plus l'engin est lourd plus la pression « pénètre » dans le sol même si l'augmentation de la surface de contact permet de réduire ou maintenir une pression faible en surface.
6. Comme nous venons de le voir, pour réduire la pression exercée sur le sol et les dégradations associées, il faut surtout réduire la charge à la roue. Or la tendance

observée dans le secteur forestier, comme en agriculture, est une augmentation globale de la masse des engins avec ou sans augmentation de la charge utile. Le graphique ici, présente l'évolution depuis 1993 de la masse à vide et des charges à la roue moyennes, en bleu, et maximales, en orange, d'un porteur de capacité 12 tonnes. Pour une même charge utile de 12 tonnes, la charge à la roue maximale est passée de 3.8 tonnes en 1993 à 4.4 tonnes en 2019, soit une augmentation de 16 %.

7. On pense souvent que répartir les passages sur l'ensemble de la parcelle serait moins impactant pour le sol que des passages répétés en un seul endroit. Cependant au fil des chantiers successifs, le nombre de passages sur l'ensemble de la surface va augmenter. Par exemple, durant 5 phases exploitations d'une parcelle, au lieu d'avoir eu une trentaine de passages toujours au même endroit, sur 20% de la surface dédiée, on aura eu une dizaine de passages sur les différents chemins utilisés, répartis sur l'ensemble de la surface. Or, si on regarde les impacts au sol en fonction du nombre de passages, on voit que le maximum de dégâts est généré dès les premiers passages. Le graphique ici montre l'évolution de la porosité libre à l'air en ordonnée, c'est-à-dire le volume occupé par l'air par rapport au volume total de sol, par couche de sol, 5 cm, 10 cm et 20 cm, en fonction du nombre de passages. Plus la valeur de porosité libre à l'air est élevée, plus l'air circule facilement dans le sol. La diminution de la porosité à l'air est forte durant les premiers passages puis se stabilise après trois passages. Ce qui s'explique par le fait que les particules de sol se ré-organisent pour mieux résister à la pression. Au fur et à mesure des passages, le sol est de plus en plus dense et donc de plus en plus résistant. Ces résultats mettent donc clairement en évidence que limiter la circulation des engins à certaines zones d'une parcelle est efficace pour réduire le tassement des sols.
8. Nous l'avons vu précédemment, les impacts du tassement sur les peuplements varient peu en fonction du type de sol. D'autres études montrent également que, toutes conditions égales par ailleurs, les sols sableux se déforment autant que les sols argileux sous le passage d'engins. Tous les sols sont sensibles à une déformation y compris, comme nous l'avons évoqué précédemment, les sols ayant des charges importantes en éléments grossiers pour lesquels une perte de porosité est très grave car il y a très peu de terre fine entre les cailloux.

Le principal facteur influençant la déformation du sol est son humidité : plus le sol est humide, plus il se déforme et se ré-organise suite à un passage d'engin. Plus le sol est humide, plus la pression "pénètre" dans le sol comme nous pouvons le voir sur ce graphique qui présente les lignes d'iso-pression au sein du sol en fonction de l'humidité de celui-ci. Par exemple, en sol humide, la ligne d'isopression sigma 0.2, qui correspond à 20% de la pression exercée par l'engin à la surface du sol, atteint 35 cm de profondeur alors qu'elle n'atteint que 15 cm en sol sec.

9. Un autre exemple issu du projet EFFORTE illustre les interactions entre les caractéristiques des machines, l'état d'humidité du sol et le nombre de passages. Les deux graphiques montrent la profondeur d'orniérage, en ordonnée, en fonction de la charge cumulée, engin + bois, qui a circulé sur les cloisonnements, et du type de porteur. Le graphique de gauche est un site caractérisé par un sol frais presque sec alors que le graphique de droite est un site caractérisé par un sol humide. Sur les

deux sites étudiés, un porteur léger, en vert sur le graphique de gauche et en jaune sur le graphique de droite) et un porteur lourd (en rouge sur le graphique de gauche et en orange sur le graphique de droite) ont été testés. Sur le site humide, un porteur très léger (en bleu sur le graphique de droite) a été testé en supplément. L'objectif était d'observer leurs impacts respectifs pour une même quantité de bois sortie de la parcelle. Quand le sol est sec à frais, comme dans le cas de gauche, les ornières ne dépassent pas 10 cm quel que soit le porteur, peu importe la charge cumulée qui a circulé sur le cloisonnement. Quand le sol est humide, sur la figure de droite, seul le très petit porteur, en bleu, a permis de sortir la quantité maximale de bois sans créer d'ornières supérieures à 10 cm, même en 17 passages, alors que les porteurs léger et lourd ont créé des ornières supérieures à 10 cm en 7 et 11 passages, respectivement. L'augmentation de la masse des engins a ainsi des conséquences importantes sur l'orniérage quand les sols sont humides.

10. Récapitulons maintenant les interactions entre la machine et le sol, et les impacts observés :

- l'impact est maximal dès trois passages d'engin, et ce pour toutes les situations. Cet impact est fort à la fois sur le fonctionnement du sol et du peuplement forestier même dans le cas d'impact visuel de faible intensité

- la restauration naturelle de la porosité, c'est-à-dire sans intervention humaine post-tassement, est lente, elle est de l'ordre de plusieurs décennies. Le travail du sol peut restaurer une partie des fonctions d'un sol tassé mais cette restauration n'est que partielle en termes de stabilité de la structure créée et de profondeur ameublie.

Par conséquent, la prévention est indispensable, en limitant la surface impactée par la circulation des engins. Cela implique de dédier une partie de la surface des parcelles à la circulation, en installant des voies de circulation pérennes que sont les cloisonnements. Les engins ne doivent jamais sortir de ces cloisonnements. Le compromis optimal entre le pourcentage minimal de surface dédiée à la circulation, qui représente une perte de surfaces pour la production, et la facilité d'accès à la ressource bois pour les machines est environ 20% de la surface dédiée à la circulation soit un cloisonnement de 4 m tous les 18 à 20m.

11. Cependant, limiter la circulation aux cloisonnements n'est pas simple, ils peuvent rapidement se dégrader si la circulation a lieu dans de mauvaises conditions. De plus, les parcelles sont rarement vierges de toute circulation, il est donc essentiel de partir des voies de circulation existantes pour installer les cloisonnements. Cela permet de limiter la surface impactée mais il faut garder à l'esprit les schémas de plantation éventuels à mettre en œuvre ultérieurement et qui nécessitent une certaine régularité dans l'espacement et la linéarité des cloisonnements. Il est également nécessaire de maintenir à long terme une bonne signalisation de ces voies de circulation. Les deux photos à l'écran illustrent la difficulté de limiter la surface impactée par le tassement. Celle de gauche montre en rouge des traces de passages d'engins détectées au LIDAR, un laser aéroporté. Ces traces sont en partie parallèles et régulièrement espacées, correspondant à des cloisonnements, et en partie obliques et quelconques, donc en dehors des cloisonnements. Il n'est pas possible, à

partir de ces images, d'identifier si les traces hors cloisonnements sont anciennes ou récentes et donc s'il y a un problème actuel de sorties de cloisonnements sur cette forêt. Mais nous voyons bien ici que le pourcentage de la surface circulée est très supérieur aux 20% théoriques que nous espérons atteindre en installant un cloisonnement de 4 m tous les 18-20 m. La photo de droite montre le résultat d'une circulation sur cloisonnements humides avec des sorties fréquentes de cloisonnement et une absence de marquage post-coupe. Pour que les cloisonnements soient pérennes et respectés, il est nécessaire d'en prendre soin, c'est-à-dire de maintenir leur praticabilité à long terme, et de les matérialiser durablement sur le terrain et sur des cartes.