



HAL
open science

L'air du sol, c'est la vie de la forêt

Noémie Pousse, Jean-François Ponge, Michel Bartoli

► **To cite this version:**

Noémie Pousse, Jean-François Ponge, Michel Bartoli. L'air du sol, c'est la vie de la forêt. *La Forêt Privée - revue forestière européenne*, 2022, 388, pp.58-67. hal-03857524

HAL Id: hal-03857524

<https://hal.science/hal-03857524v1>

Submitted on 4 Jan 2023

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Public Domain

L'air du sol, c'est la vie de la forêt

Noémie Pousse, Jean-François Ponge & Michel Bartoli

Cet article est une version actualisée et enrichie de l'article « L'air du sol, c'est la vie de la forêt » paru en 2009 dans La Forêt Privée.

L'air dans le sol est ce qui permet la vie dans le sol et ainsi son fonctionnement biologique. Il est vital et ne peut se trouver que dans les espaces « vides ». Sans espaces vides dans les sols pas de vie ! Ces espaces ne sont pas vides en réalité car ils sont occupés par l'eau et l'air. Ce sont juste des espaces non remplis par des particules solides (sable, limon, argile, matière organique).

Pourquoi parler d'espaces vides et d'air dans une revue forestière ? Parce que nous, forestiers, avons la responsabilité d'en prendre soin sans les voir. Notamment, la circulation des engins, en rapprochant les particules solides entre elles, chasse l'air et diminue durablement la capacité de transfert des fluides (air et eau) et d'enracinement de la végétation dans le sol. Ces effets complexes et leur répercussion sur les peuplements forestiers sont encore loin d'être entièrement compris, nous ne ferons que survoler le sujet et actualiser l'état des connaissances.

Le sol, un matériau poreux

Un sol forestier est constitué

- de solides :
 - minéraux : issus de la roche, en fonction de la taille des particules on distingue la terre fine (argile < limon < sable) et les éléments grossiers (de taille > 2mm : graviers, cailloux...), la « terre ».
 - organiques : des organismes vivants, des végétaux (leurs racines au moins), des champignons, l'humus qui est le résultat de la transformation des organismes morts et de la litière (accumulation de feuilles, aiguilles et autres débris végétaux) par les décomposeurs vivants.
- de liquides : de l'eau et de nombreuses substances qui y sont dissoutes
- de gaz, notre air, dont la composition est modifiée dans le sol par la respiration des organismes vivants et les conditions de transfert plus ou moins limitées.

L'agencement des constituants solides entre eux (appelé structure) crée des espaces vides, la porosité du sol. Cette structure est formée par l'agencement mécanique et chimique des particules solides entre elles (par exemple les grains de sable ne sont pas jointifs ou encore les agiles se lient entre elles par des interactions physico-chimiques), et surtout par l'activité des êtres vivants (faune du sol, bactéries, champignons, racines). Les racines qui avancent puis pourrissent, les taupes et autres micromammifères, les vers de terre bien sûr et le reste de la faune creusent pour créer ce qu'en termes savants on nomme la « porosphère ». Celle-ci est une création de la vie, vie qui va, massivement, utiliser l'oxygène que les pores qu'elle a elle-même créés mettent à sa disposition.

La porosité, un espace nécessaire au fonctionnement du sol

La porosité est occupée par de l'air et de l'eau, sauf quand le sol est saturé, la porosité se retrouvant alors uniquement occupée par de l'eau, et bien entendu il n'y a plus d'eau libre dans le sol lorsque la porosité a disparu. La quantité d'espaces vides joue un rôle important, mais aussi leur connectivité, leur taille, leur forme. Tous ces critères conditionnent les échanges d'eau et de gaz entre l'atmosphère et le sol, puis au sein du sol. Par exemple, les espaces vides moyens (0,2 à 10 µm) retiennent l'eau absorbable par les plantes alors que les espaces vides grossiers (>10 µm) permettent l'infiltration de l'eau (donc la recharge des horizons profonds et l'aération du sol). Un sol sableux contient plus de pores grossiers que de pores moyens alors que c'est l'inverse pour un sol argileux.

Malgré les difficultés de sa mesure, on constate que la composition de l'air du sol n'est pas la même que celle de l'air ambiant (tableau 1).

constituant	Air du sol (%)	Atmosphère extérieure (%)
Oxygène (O ₂)	21 en sol bien aéré (sec et bien structuré) 10 à 18 après une pluie ou en sol tassé	21
Azote (N ₂)	78,5 à 80	78
Gaz carbonique (CO ₂)	0,04 à 4 (sol bien aéré) ou 0,04 à 8 (sol tassé) 5 à 10 dans la zone autour des racines	0.04

Tableau 1 : Composition comparée de l'air du sol et de l'atmosphère extérieure (simplifié d'après Gobat *et al.* (2013); Goutal *et al.* (2013))

La composition de l'air du sol est le résultat d'un ensemble complexe de processus physiques et biologiques. L'air du sol est en contact avec l'atmosphère via un réseau de pores interconnectés. La diffusion de cet air est modifiée en proportion de la profondeur, la taille des pores et leur remplissage par l'eau du sol.

Cet air « atmosphérique » est ensuite modifié par les organismes qui y respirent, en particulier les racines des végétaux (la moitié de la respiration du sol est d'origine végétale) et les microorganismes (bactéries, champignons) : ils lui retirent de l'oxygène et le chargent en gaz carbonique. Les racines et les microorganismes produisent également des molécules volatiles qui vont donner à l'air du sol son « parfum » caractéristique, que l'on respire lorsque le sol est remouillé (l'odeur du sol, chassée par la pluie et qui remonte ainsi jusqu'à nos narines). Ces composés servent aux animaux du sol (et aux sangliers !) à trouver leur nourriture : la recherche des truffes est basée sur ce principe. Parmi ces molécules olfactives, il y a de nombreux terpènes (hydrocarbures à trois atomes de carbone) d'origine tout à fait naturelle.

Une modification des échanges de gaz avec l'atmosphère (aération du sol) et de l'activité biologique (production et consommation des gaz) va entraîner un changement de composition du mélange gazeux au sein du sol par rapport à celle de l'atmosphère. La quasi-totalité des organismes vivants du sol consomment, tout comme nous, de l'oxygène et rejettent du gaz carbonique (CO₂). Les racines, par exemple, consomment 350 litres d'oxygène (et autant de gaz carbonique rejeté) par mètre carré de sol et par an. L'oxygène diffuse 10 000 fois plus lentement dans l'eau que dans l'air, sa présence au

sein du sol est ainsi fortement influencé par le degré de saturation du sol en eau (Goutal et al., 2013), lui-même influencé par la structure du sol.

Le fonctionnement des racines et de leurs partenaires mycorhiziens (champignons vivant en symbiose avec les racines) est très sensible à l'accessibilité de l'oxygène dans le sol. Quand le taux d'oxygène du sol est inférieur à 1% les racines et les champignons meurent. Comme l'air du sol n'est qu'en partie de l'oxygène, cela signifie qu'un taux de macroporosité inférieur à 10% du volume total de sol entraîne une réduction quasi-complète de l'activité racinaire.

Le passage des engins comble les trous et asphyxie le sol...

Le passage des engins d'exploitation forestière provoque un changement de structure du sol. En effet, les particules solides se ré-organisent horizontalement face à la contrainte principalement verticale exercée par les engins. Cette réorganisation augmente la densité du sol et diminue les vitesses de transfert de l'air et de l'eau (Goutal-Pousse *et al.*, 2014).

Plus la ré-organistaion des particules solides est intense (figure 1a), plus l'eau reste en surface (figure 1b) à cause d'une réduction forte de la vitesse de transfert de l'eau dans le sol (figure 1d). Les ornières de type 3 correspondent à une déformation par écoulement visqueux, soit une liquéfaction du sol (boue) quand le passage de l'engin a lieu sur sol humide. Dans ce cas là, le fonctionnement du sol est très fortement affecté (Lüscher *et al.*, 2015).

Dans une structure de sol intacte, on trouve surtout des bactéries aérobies dont la respiration produit du CO₂, mais lorsque le sol subit des modifications structurelles plus importantes, ces bactéries disparaissent peu à peu au profit des populations anaérobies (Frey *et al.*, 2009).

Parmi les microorganismes anaérobies n'ayant pas besoin d'oxygène pour produire de l'énergie figurent les bactéries dénitrifiantes, produisant du protoxyde d'azote (N₂O), et méthanogènes, produisant du méthane (CH₄), gaz dont on sait qu'il joue un rôle très important dans « l'effet de serre » (1T de CH₄ correspond à 25T de CO₂, 1T de N₂O correspond à 298T de CO₂). L'activité des bactéries méthanotrophes, oxydant le méthane (c'est-à-dire le « consommant »), serait limitée principalement par l'humidité du sol qui est augmentée par le tassement (figure 1b). La compaction du sol aurait une influence à la fois sur les bactéries méthanogènes (stimulées) et méthanotrophes (réprimées), augmentant ainsi la production de méthane et diminuant fortement le potentiel du sol à prélever du méthane atmosphérique (flux négatif pour un sol forestier non perturbé, figure 1c).

Dans les ornières de type 2 (figure 1a), une présence accrue de dénitrificateurs a été constatée et dans les ornières de type 3, les conditions requises pour la production de méthane sont atteintes (Lüscher *et al.*, 2015).

Petit glossaire

Anaérobie (ant. Aérobie): organisme vivant (ne) pouvant (pas) se développer en l'absence d'oxygène

Anoxique (ant. : Oxique): horizon du sol (ne) renfermant (pas) d'oxygène

Si certaines études montrent la résistance des microorganismes au tassement, d'autres montrent que la biomasse et l'activité microbiennes diminuent suite au tassement. Ces divergences s'expliquent par l'intensité de l'impact constaté, notamment par la présence ou l'absence d'engorgement suite au tassement. En effet, s'il n'y a pas encore de problème d'engorgement, les communautés microbiennes sont peu affectées par la déstructuration du sol car si la part des gros pores diminue, la microporosité et ainsi le nombre de niches colonisables par les microorganismes augmentent.

Mais bien souvent, le tassement du sol réduit la biomasse microbienne et modifie l'activité enzymatique. Ceci provoque alors une réduction des transformations des formes de l'azote et du phosphore et ainsi une diminution des stocks biodisponibles de ces deux éléments essentiels à la nutrition tant microbienne que végétale, surtout dans des écosystèmes à faibles intrants tels que les forêts.

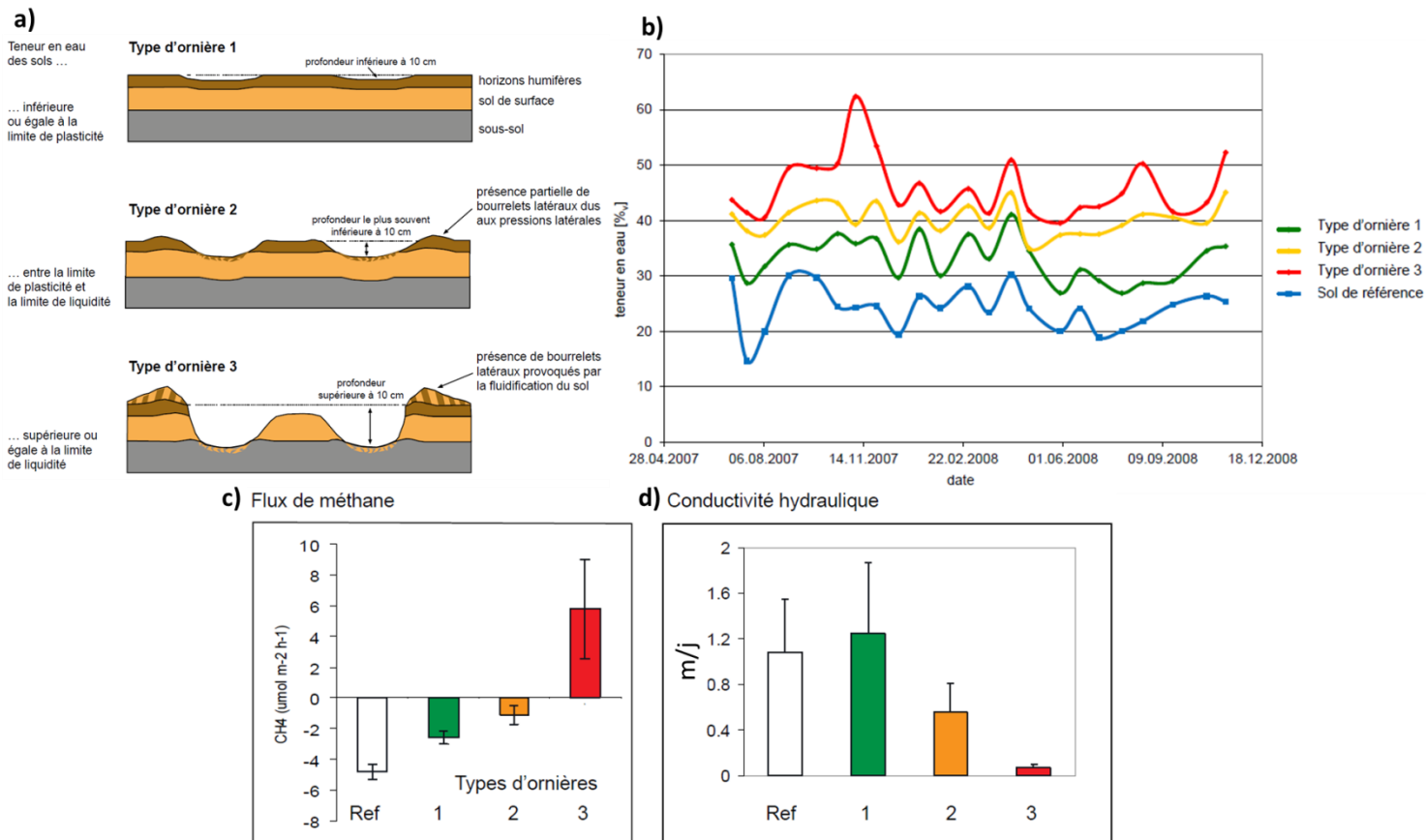


Figure 1 : le type d'ornièr comme indicateur de l'intensité de dégradation suite au passage des engins en forêt. a) condition de formation des 3 types d'ornières en fonction de la teneur en eau des sols au moment du passage et description de ces types et b) évolution de la teneur en eau de surface; c) flux de méthane à la surface du sol et d) vitesse de transfert vertical de l'eau (conductivité hydraulique) en fonction du type d'ornièr (Lüscher *et al.*, 2015).

...les racines en pâtissent

En 2005, von Wilpert et Schäffer mesurent les effets du passage d'engins dans les sols des cloisonnements de 5 forêts allemandes. Ils y mesurent le coefficient relatif de diffusion des gaz : dans un des sites, il est de 0,03 pour le témoin non circulé, mais il passe à 0,007 sous les passages des roues et à 0,015 dans l'entre-roues, cela 6 ans après le passage d'une abatteuse et d'un porteur. Les conséquences sur les racines sont très nettes et la densité de racines diminue surtout en profondeur (von Wilpert & Schäffer, 2006).

Ces résultats se retrouvent de manière globale, la méta-analyse (analyse globale effectuée sur un grand nombre de publications) de Mariotti *et al.* (2020) montrant une diminution en moyenne de 30% de la profondeur d'enracinement suite à des passages d'engins en forêt (figure 2). La production de

biomasse est également affectée, seule la surface foliaire n'est pas affectée par la circulation des engins, en lien probable avec la diminution de la concurrence.

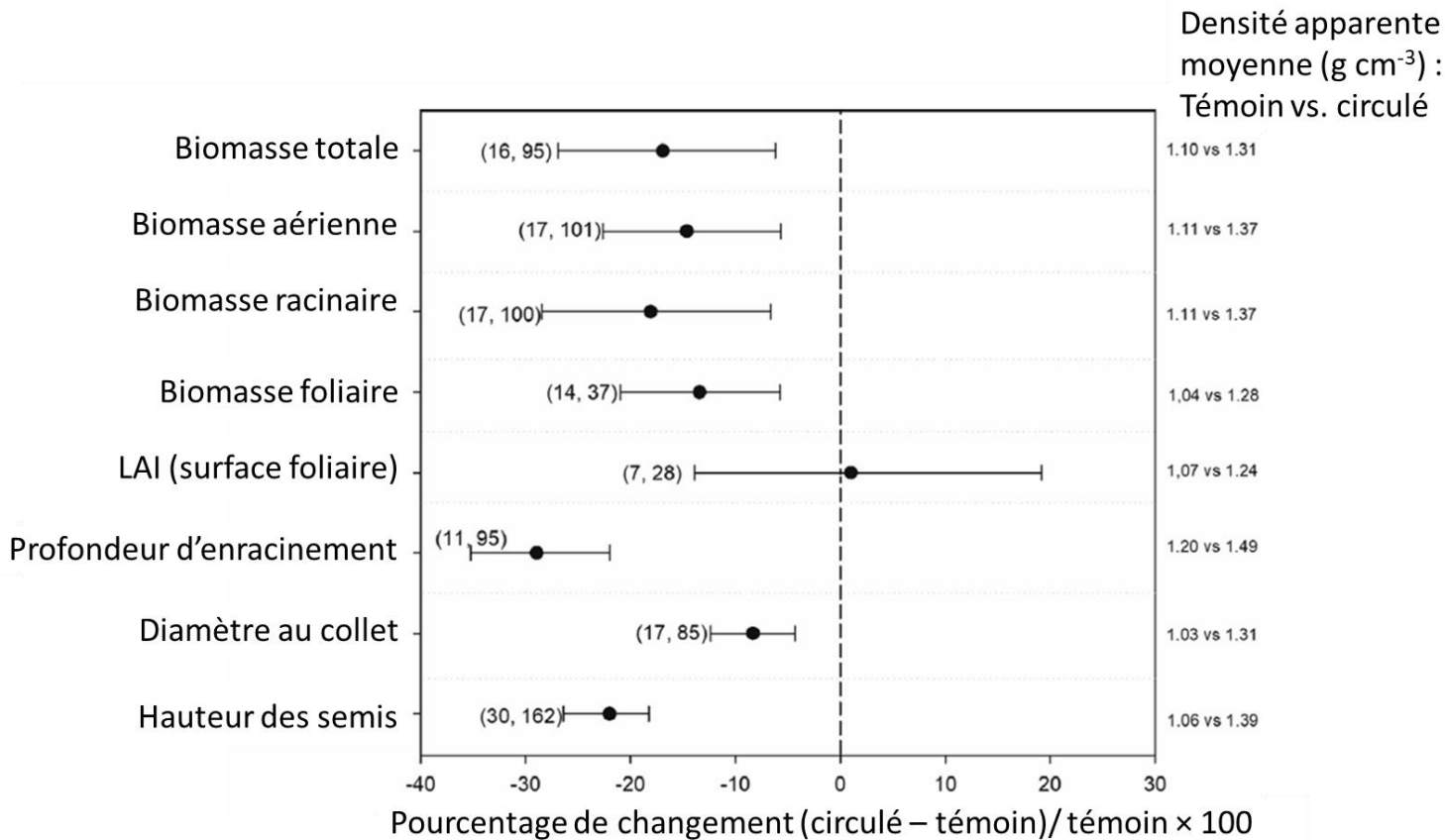
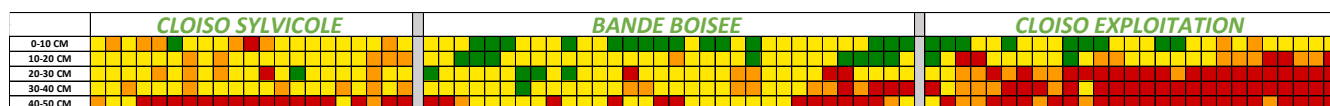


Figure 2 : Effet du tassement sur les paramètres dendrométriques des peuplements. Rond noir = moyenne du pourcentage de changement (circulé – témoin)/ témoin. Entre parenthèses : nombre d'études suivi, après la virgule, par le nombre d'observations. Les effets sont significatifs quand l'intervalle de confiance (barre noire) ne contient pas 0 (Mariotti *et al.*, 2020).

La diminution de densité racinaire est croissante avec l'intensité de l'impact (figure 3), quand on compare l'intensité de l'enracinement sous les traces de passage de broyeurs forestiers par rapport au passage de porteurs (Pousse *et al.*, 2022).

Si les arbres sont fortement affectés par l'orniérage en raison des mauvaises conditions atmosphériques et hydriques régnant dans les sols compactés, certaines plantes se révèlent être adaptées au tassement. Les joncs, qui possèdent un aéraenche, tissu laissant circuler l'air à l'intérieur de la plante jusqu'au niveau des racines, sont à leur affaire dans les ornières, où leur présence en forêt indique un fort tassement des sols.

C'est également le cas des Carex (les laïches) qui possèdent également un aéraenche, moins développé cependant que celui des joncs. On remarquera également que le tassement des sols favorise une explosion de plantes rudérales et envahissantes. Celles-ci peuvent le plus souvent vivre sans nécessiter une symbiose avec des champignons (mycorhizes), comme les plantes de la famille des Brassicacées (ex Crucifères), tout comme d'ailleurs les Carex et les joncs.



Densité de racines : ■ 1 ou 2 / dm² ■ 2 à 3 / dm² ■ 4 à 10 / dm² ■ 11 à 50 / dm²

Figure 3 : La densité globale de racines diminue avec la profondeur et dès qu'on se trouve sous les voies de passage des engins (bande boisée non circulée, cloisonnement sylvicole concerné seulement par la circulation de broyeur forestiers et cloisonnement d'exploitation concerné par la circulation de porteurs). Chaque case représente un carré de 10cm * 10cm (Pousse *et al.*, 2022).

...et pendant longtemps !

En l'absence de remédiation mécanique, la restructuration d'un sol se réalise grâce à des processus naturels, physiques et/ou biologiques : action des cycles de gel-dégel et humectation-dessiccation; activité biologique de la faune du sol et des racines essentiellement.

Cependant, la croissance et l'activité racinaires sont fortement réduites après le passage d'engins et la faune du sol peut être fortement affectée par la compaction et ne pas ou peu recoloniser les zones tassées du sol. Il est courant que l'on fasse confiance à l'activité des vers de terre pour aérer le sol après tassement. Or plusieurs travaux ont montré que l'augmentation de la densité apparente du sol (résultant du tassement) défavorisait l'activité des vers de terre (Capowiez *et al.*, 2021). Lorsque les vers de terre ont le choix entre un sol tassé et un sol non tassé, leur activité va donc se cantonner à ce dernier, réduisant ainsi fortement leur capacité à restaurer le sol. De plus, le tassement contraint l'enracinement, réduisant la consommation d'eau dans les horizons profonds, et diminue l'infiltration d'eau, la ré-humectation des horizons profonds en étant fortement affectée. Ces deux conséquences du tassement limitent l'amplitude des cycles d'humectation-dessiccation. Selon les études (type de sol, climat, impact initial, paramètres étudiés), le temps nécessaire au sol pour revenir, après tassement, à un fonctionnement non perturbé varie de une à plusieurs dizaines d'années, voire des centaines.

Deux dispositifs expérimentaux, mis en place par l'INRAE avec le soutien de l'ONF en 2007 et 2008, permettent d'étudier les effets à long terme du passage des engins sur les sols forestiers. Les deux sites expérimentaux sont situés sur des sols similaires issus d'un placage limoneux de 50 cm environ sur argile, avec quelques traces témoignant de la présence d'une nappe temporaire entre 40 et 50 cm de profondeur. Pour les deux sites, le traitement témoin correspond à un débardage des bois par câble-mât alors que le traitement tassé correspond à un aller-retour d'un porteur d'environ 20 T en charge, dans des conditions de sol frais à humide, occasionnant une diminution de hauteur du sol d'environ 5 cm (Goutal Pousse *et al.*, 2014).

Les impacts de ce tassement très modéré (ornières de type 1) sur le fonctionnement du sol ont été forts et immédiats : augmentation de l'intensité de l'engorgement temporaire, modification de la composition de l'atmosphère et de la solution du sol, augmentation en surface et diminution en profondeur de l'humidité, augmentation de la mortalité des plants lors des années humides, diminution de la croissance en hauteur et en circonférence. Une dizaine d'années après les deux passages du porteur, les chênes sessiles ont un volume 20 à 40% plus faible que dans le traitement témoin. Les différents services rendus par le sol sont toujours profondément affectés une dizaine d'années après le tassement (figure 4).

service écosystémique impacté		potentiel naturel du sol	aptitude résiduelle	source de données
C	Séquestration du carbone	5	4.8	Pas de différences significatives de teneur en carbone organique 3 ans après tassement (baisse des flux de CO2 mais productivité végétale moindre => compensation?, effets à plus long terme?), modifications de la teneur en carbone dissous dans l'eau du sol
E	Purification de l'eau et réduction des contaminants du sol	5	2.5	Goutal et al., 2013 et Bonnaud et al., 2019 : conditions anaérobiques => mobilité Fe, Zn et Mn, changement composition de l'eau du sol
R	Régulation du climat	5	4.0	Epron et al., 2016 : diminution de la capacité du sol forestier à absorber le méthane. Goutal et al., 2013: taux de survie et productivité moindre du peuplement forestier (stockage moindre de carbone, évapotranspiration réduite, modification de l'albédo)
N	Cycles des éléments nutritifs	4	0.8	Bottinelli et al., 2014b : modification de la structure du sol => modification de la dynamique et de la composition chimique de l'eau du sol (Bonnaud et al., 2019) + modification de l'aération du sol (Goutal et al., 2013) => modification de l'enracinement et la circulation des éléments nutritifs dans l'écosystème
H	Habitats pour une multitude d'organismes	4	0.8	Bottinelli et al., 2014a et b, Goutal et al., 2012 : perte de 90% des vers de terre et diminution de la respiration du sol
I	Régulation des crues	4	2.0	Bonnaud et al., 2019 : dans le témoin, la nappe temporaire est entre 40 et 50cm de profondeur, dans le tassé la nappe perchée temporaire est en surface, plus fréquente et dure plus longtemps (imperméabilisation du sol via la compaction et l'ornièrage)
G	source de composants pharmaceutiques et de matériel génétique	non déterminé	0	Pas de données
S	Fondement pour les infrastructures humaines	3	1.2	Goutal-Pousse et al., 2016 : effet de la compaction sur le gonflement-retrait, prise en masse de sol limoneux après tassement (site de Clermont-en-Argonne)
M	Fourniture de matériaux de construction	5	2.5	Diminution du taux de survie après plantation et diminution de la croissance en hauteur (Goutal et al., 2013)
P	Patrimoine culturel	non déterminé	0	Pas de données
F	Fourniture d'aliments, de fibre et de combustibles	5	2.5	Diminution du taux de survie après plantation et diminution de la croissance en hauteur (Goutal et al., 2013)

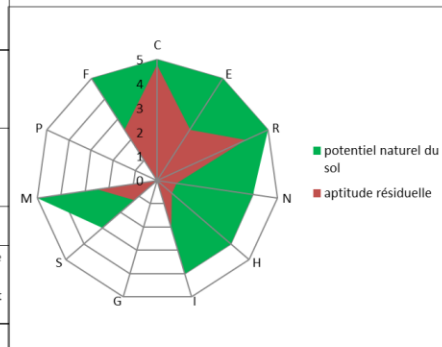


Figure 4 : analyse multi-dimensionnelle des impacts qu'un aller-retour d'un porteur de 20T entraîne (Ay et al., 2020)

Les processus de restauration naturelle observés sur les deux sites sont principalement liés à l'alternance gel-dégel (températures négatives dans le sol à 10cm de profondeur constatées seulement en 2007, 2009 et 2012) et humectation-dessiccation en surface (Bottinelli et al., 2014). Ils permettent de recréer des espaces vides en surface du sol (figure 5) mais ces espaces vides sont orientés selon les plans de faiblesse de la structure du sol qui sont principalement horizontaux (réaction à une contrainte verticale).

Pour le site qui a un pH de 5 en surface, l'activité des vers de terre anéciques y est plus forte, le potentiel de restructuration du sol y est donc plus important même s'il met une dizaine d'années avant de s'exprimer (impact initial fort du tassement sur les vers de terre). Au cours du temps, la résistance à la pénétration diminue et la vitesse d'infiltration de l'eau en surface augmente. Cette restauration n'est que partielle, elle ne concerne que les horizons de surface.

Pour le site qui a un pH légèrement inférieur à 4,5 en surface, l'activité des vers de terre ne se produit qu'en surface. En conséquence, La restructuration se fait principalement par gel-dégel et humectation-dessiccation, ce qui ne permet pas un retour à une structure stable et favorable à la prospection racinaire (effet toujours visible sur la résistance à la pénétration et la vitesse d'infiltration de l'eau dès la surface et jusqu'à 70 cm de profondeur). Par contre, la colonisation des sols tassés par le bouleau permet assez rapidement de diminuer l'engorgement du sol (la nappe perchée temporaire créée par tassement persiste moins longtemps). Cette dynamique végétale pourrait éventuellement contribuer à restructurer le sol (galeries de racines, exsudats racinaires...) mais plus lentement que via l'action des vers de terre anéciques.

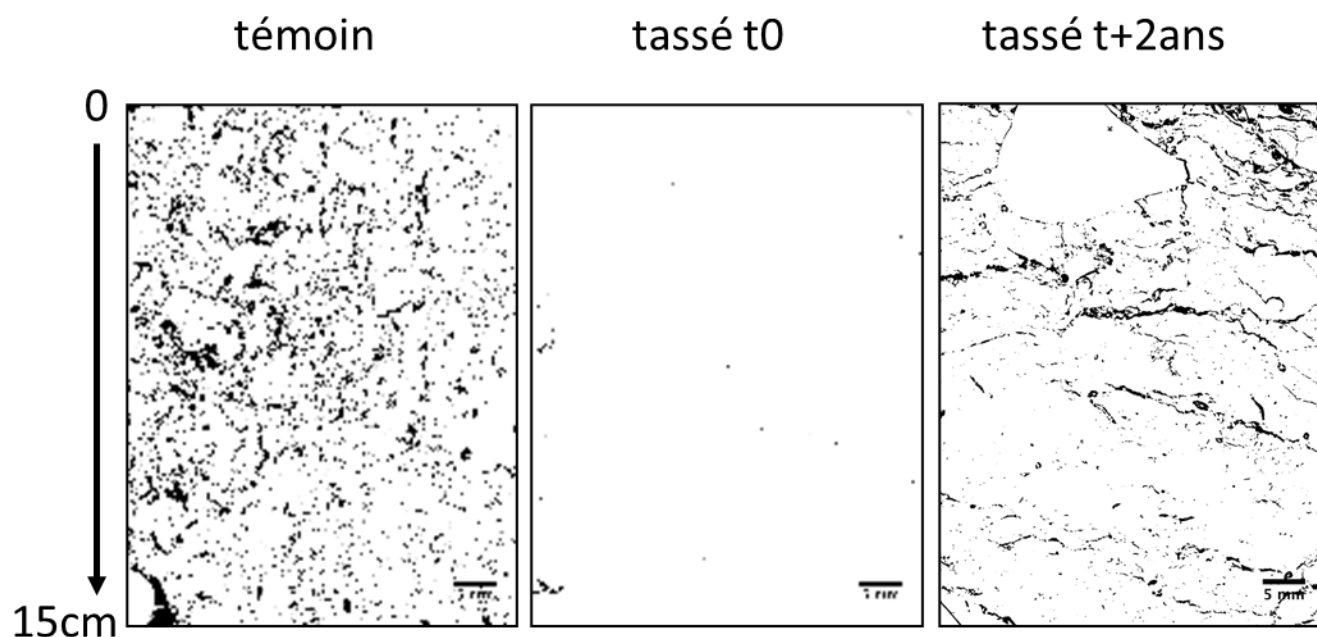


Figure 5 : Analyse d'images sur lames minces de sol, les espaces vides sont en noirs. Dispositif expérimental de suivi à long terme de effets du tassement d'Azerailles (54), le traitement témoin a été débarrassé par câble-mât, le tassé a fait l'objet d'un aller-retour d'un porteur de 23T en charge sur sol frais (Bottinelli *et al.*, 2014)

En guise de conclusion

Le simple fait de chasser l'air d'un sol a, on vient de le voir, un impact grave. Il ne faut donc pas s'étonner de constater des mortalités d'arbres en bordures des zones circulées par les engins d'exploitation. En plus des dégâts causés à l'atmosphère du sol, soulignés dans cet article, il faut signaler également les dégâts physiques causés au système racinaire des arbres, qui s'étend bien au-delà de la surface projetée de la couronne : rupture des vaisseaux conducteurs de la sève ascendante et porte ouverte aux infections sont les principaux dommages signalés par les travaux portant sur ce thème.

Concentrer la circulation des engins sur des voies pérennes permet de réduire la surface impactée, car les impacts sont forts et durables dès les premiers passages. Cependant, la praticabilité des cloisonnements et donc l'efficacité de cette mesure peuvent être remises en cause dès lors que la circulation est intervenue sur sols humides. Dans ces conditions, les cloisonnements voient leur capacité de drainage diminuer sensiblement et restent trop humides une grande partie de l'année, compliquant les chantiers ultérieurs.

Bien sûr, cela n'aura pas lieu si le sol est assez sec pour que son squelette résiste aux pressions exercées par les machines.

Chaque machine – équipée en pneus plus ou moins larges, plus ou moins lourde ou chargée etc. – exerce une pression assez facile à connaître sur un sol dont les caractéristiques physiques - sa texture - doivent être bien appréciées. Un remarquable logiciel allemand, Profor©, calcule alors la teneur en eau maximale au-delà de laquelle la pression de cette machine va conduire à une réduction trop

importante de la capacité de drainage du sol (Matthies *et al.*, 2006). En mesurant la teneur en eau du sol, on dispose d'un outil de prévention qui permettrait d'éviter des dégâts trop importants en forêt. Le guide PROSOL permet également d'apprécier la sensibilité des cloisonnements forestiers à une remise en question de leur praticabilité et de mettre en œuvre des pratiques adaptées pour prévenir les dégâts de tassement en forêt en les concentrant sur la plus petite surface possible (Pischedda, 2009).

Pour en savoir plus

- Ay, J.-S., Pousse, N., Rigou, L. & Thannberger, L. 2020. Vers une évaluation des coûts de la dégradation des sols : Éléments de cadrage, outil d'analyse et études de cas. *Etude et Gestion des Sols*, **27**, 147–162.
- Bottinelli, N., Hallaire, V., Goutal, N., Bonnaud, P. & Ranger, J. 2014. Impact of heavy traffic on soil macroporosity of two silty forest soils: Initial effect and short-term recovery. *Geoderma*, **217–218**, 10–17.
- Capowiez, Y., Sammartino, S., Keller, T. & Bottinelli, N. 2021. Decreased burrowing activity of endogeic earthworms and effects on water infiltration in response to an increase in soil bulk density. *Pedobiologia*, **85–86**.
- Frey, B., Kremer, J., Rüdts, 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**, 312–320.
- Gobat, J.-M., Aragno, M. & Matthey, W. 2013. *Le sol vivant - bases de pédologie - biologie des sols - 3eme édition revue et augmentée*. Presses Polytechniques et Universitaires Romandes.
- Goutal Pousse, N., Bock, J. & Ranger, J. 2014. Impacts de la circulation d'un porteur forestier sur deux sols sensibles au tassement et dynamique de restauration naturelle. *Rendez-Vous Techniques*, **43**, 33–39.
- 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.
- Lüscher, P., Frutig, F. & Thees, O. 2015. *La protection des sols en forêt contre les atteintes physiques. La gestion forestière entre les impératifs de rentabilité et la préservation des propriétés physiques du sol*. Office fédéral de l'environnement. Berne.

- Mariotti, B., Hoshika, Y., Cambi, M., Marra, E., Feng, Z., Paoletti, E. & Marchi, E. 2020. Vehicle-induced compaction of forest soil affects plant morphological and physiological attributes: A meta-analysis. *Forest Ecology and Management*, **462**, 118004.
- Matthies, D., Ziesak, M. & Kremer, J. 2006. Le logiciel ProFor : un outil de prévention pour juger de la praticabilité des sols lors de l'exploitation forestière. *Rendez-Vous Techniques*, **14**, 3–8.
- Pischedda, D. 2009. *Pour une exploitation forestière respectueuse des sols et de la forêt «PROSOL» – Guide pratique*. ONF / FCBA. (At: <https://www.onf.fr/onf/lonf-agit/+//18b::prosol-guide-pour-une-exploitation-forestiere-respectueuse-des-sols-et-de-la-foret.html>. Accessed: 4/4/2020).
- Pousse, N., Marcet, O., Blas-Larrosa, J. & Schneider, S. 2022. Les cloisonnements sylvicoles sur sols à engorgement temporaire : à quel degré de perturbation des sols et des peuplements s'attendre ? *Rendez-Vous Techniques*, **73**, 16–21.
- von Wilpert, K. & Schäffer, J. 2006. Ecological effects of soil compaction and initial recovery dynamics: a preliminary study. *European Journal of Forest Research*, **125**, 129–138.