

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

Jean-François Ponge & Michel Bartoli

Pourquoi parler de l'air du sol dans une revue forestière ? Parce que, « tout simplement », les pneus d'une machine d'exploitation ou d'entretien sylvicole qui tassent un sol, en chassent l'air. Cet air – dire que l'on parle souvent des « vides » ! - serait donc important pour le sol ?

L'air du sol est non seulement important mais absolument indispensable à toute la vie qui crée et fait fonctionner ce sol et à toute la vie qu'il supporte, c'est-à-dire, « tout simplement », la forêt. C'est même l'activité biologique qui contribue à créer la place de l'air - la porosité - du sol. Tout est lié.

L'effet du tassement sur les transferts des fluides est très complexe et sa compréhension, encore loin d'être bien appréhendée, nécessite de coupler des approches physiques et des approches biologiques. Nous ne ferons que survoler le sujet en le simplifiant et sans pouvoir citer les sources des nombreux travaux scientifiques utilisés dont la plupart ont moins de 5 ans, montrant que le sujet est à la fois nouveau et préoccupe le monde entier.

Le sol, un matériau poreux

Un sol forestier est constitué

- de solides :
 - minéraux : la « terre », des cailloux...
 - organiques : des animaux, des végétaux (leurs racines au moins), des champignons, l'humus qui est le résultat de la transformation des organismes morts et de la litière¹ 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.

Ces deux derniers constituants occupent ce que l'on appelle la porosité du sol. Celle-ci change « d'occupant » (liquide ou gaz) selon un déséquilibre lié à la météo et à l'action de pompe des végétaux.

La porosité n'est pas facile à mesurer puisque l'échantillon à prélever ne doit pas subir de déformation. Elle varie de 30 % dans les sols limoneux à 80 % dans la partie fibreuse des tourbes. Tourbes aux pores pleins d'eau. Voilà déjà un premier exemple de sol anaérobie (c'est-à-dire sans dioxygène, O₂) où une flore et microflore particulière se développent. Mais drainez une tourbière et la tourbe va se dégrader : l'air qui vient remplacer l'eau permet à des champignons, des bactéries ou des insectes de la pénétrer et de s'en nourrir.

Quand les pores ne sont pas pleins d'eau, l'air du sol est confiné, les parties solides gênant les échanges avec l'air extérieur. La porosité du sol et sa distribution conditionnent donc, en grande partie, les échanges gazeux entre le sol et l'atmosphère. 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). Il s'y passe donc quelque chose !

Constituant	Air du sol (%)	Atmosphère extérieure (%)
Oxygène	18 à 20,5 en sol bien aéré 10 après une pluie	21
Azote	78,5 à 80	78
Gaz carbonique	0,2 à 3,5 5 à 10 dans la zone autour des racines	0,03

Tableau 1 : Composition comparée de l'air du sol et de l'atmosphère extérieure (simplifié d'après Gobat *et al.*, 2003)

Une modification des échanges de gaz avec l'atmosphère (aération du sol) et de l'activité biologique (fonction de production et de 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 consomme, tout comme nous, de l'oxygène et rejette du gaz carbonique (CO₂).

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

¹ Accumulation de feuilles ou aiguilles et autres débris végétaux.

La porosité : une création et une nécessité biologique

Si une partie de la porosité est, disons, mécanique – les grains d'un sable ne sont pas jointifs – l'essentiel est une résultante de l'activité d'êtres vivants. Les racines qui avancent puis pourrissent, taupes et autres micromammifères, les vers de terre bien sûr et toute la microfaune creusent pour créer ce qu'en terme savant on nomme la « porosphère ». Elle est une création de la vie, vie qui va, massivement, utiliser l'oxygène que les pores qu'elle a créés mettent à sa disposition.

Les êtres vivants du sol et l'oxygène contenu dans les pores

Racines: 350 litres d'oxygène absorbés (et autant de gaz carbonique rejeté) par mètre carré de sol et par an

Microflore du sol (bactéries et champignons): environ autant que les racines

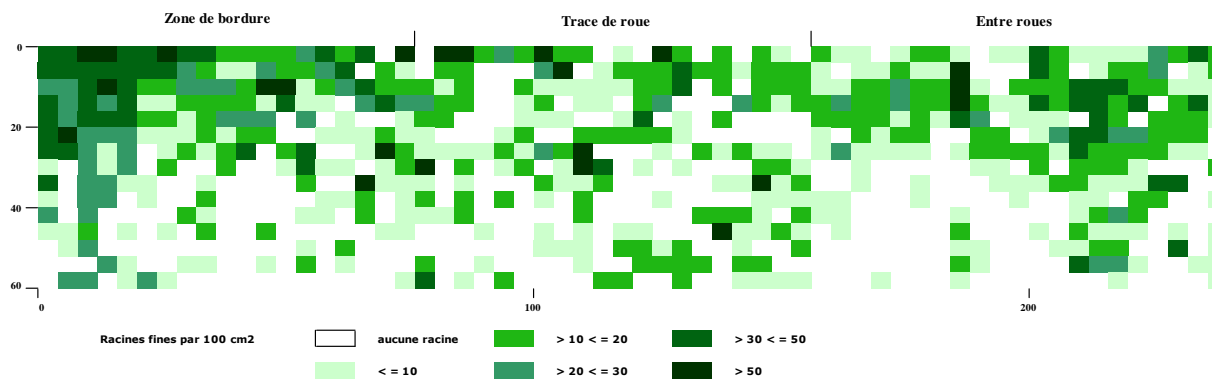
Faune du sol: seulement 5 litres

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 freinée en proportion de la profondeur, de la taille des pores et de 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. Bien entendu, la situation change dans les sols pollués, y compris en forêt, par exemple lorsque l'on vidange les... tronçonneuses !!

Les racines ont besoin d'oxygène et d'eau

Le fonctionnement des racines et de leurs mycorhizes 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 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 des racines. La concentration en CO₂ est moins modifiée par le tassement que celle en O₂ car, d'une part la solubilité du CO₂ dans l'eau est largement supérieure à celle de O₂, et d'autre part la production principale de CO₂ a lieu dans le sol : si on a montré une diminution significative de la concentration en O₂ dans les traitements tassés par rapport au témoin, cette diminution était d'autant plus importante, à contrainte exercée identique, que le sol était humide au moment du tassement.

En 2005, von Wilpert et Schäffer ont mesuré les effets du passage d'engins dans les sols des cloisonnements de 5 forêts allemandes. Ils y ont mesuré le coefficient relatif de diffusion des gaz² : dans un des sites, il est de 0,03 pour le témoin non circulé. 6 ans après le passage d'une abatteuse et d'un porteur, il passe à 0,007 sous les passages des roues et à 0,015 dans l'entre-roues. Une tranchée est creusée pour voir les conséquences sur les racines ; le résultat est éloquent (figure 1).



² Le coefficient relatif de diffusion est D_s/D_o où D_s est le coefficient de diffusion du gaz dans le sol et D_o est le coefficient du même gaz dans l'atmosphère et dans les mêmes conditions de température et de pression.

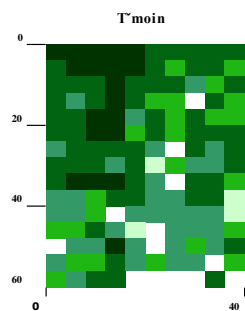


Figure 1 : 6 ans après le passage d'une abatteuse et d'un porteur, leur impact est très net sur la densité de racines fines (< 2 mm), celles qui alimentent l'arbre en eau et en minéraux. (d'après von Wilpert et Schäffer, 2005)

Il faut noter que le manque d'air (le tassement donc) va

- (1) loin en profondeur
- (2) loin de part et d'autre des roues.

On voit aussi que la restauration de l'enracinement débute dans les horizons de surface et se propage verticalement, là où, lentement, de l'air peut revenir.

Si la porosité baisse, le réservoir qu'elle représente pour l'eau baisse avec elle. Les racines vont donc non seulement manquer d'air mais manquer d'eau et de tous les minéraux qui y sont dissous, ceux qui sont donc facilement accessibles.

Un exemple célèbre, mis en évidence en 2005³, montre que le tassement peut entraîner des désordres en cascade, économiquement très graves. Les hévéaculteurs – les multinationaux manufacturiers des pneus - s'inquiétaient depuis plusieurs années de l'apparition d'arbres nécrosés au niveau des saignées qui ne fournissaient plus de latex. Les recherches de tous les agents pathogènes pouvant affecter l'hévéa ne donnaient rien, quand un chercheur s'est aperçu que la distribution des arbres malades était liée aux zones où le passage des engins préparant les sols à leur plantation avait été plus intense. Des analyses écophysologiques ont révélé que les arbres malades étaient en situation de déficit hydrique, qui s'accroît fortement en période de sécheresse et/ou en cas de nombreux passages des engins. Le cumul de ces différents stress induit la mort de cellules au niveau du collet. Ceci se traduit par la déstructuration des compartiments cellulaires, provoquant la libération d'une grande quantité du cyanure naturellement contenu dans les tissus de l'hévéa, une Euphorbiacée. L'effet de ce poison est à l'origine de la nécrose. L'appel d'eau vers l'encoche, provoqué par les saignées, facilite la diffusion ascendante du cyanure et donc la propagation de la nécrose vers le haut du tronc. La désorganisation profonde des tissus de l'écorce qui en résulte explique l'arrêt irréversible de la production de latex.

Tassement, activité des sols et production de gaz

Les mécanismes de l'effet du tassement sur les communautés microbiennes des sols sont loin d'être complètement élucidés, mais les travaux sont nombreux. En 2005 et 2006, divers chercheurs ont montré que les sols tassés comportent moins de micro-organismes au métabolisme majoritairement aérobie, constat attendu mais donc bien vérifié. Ils ont aussi montré, par des techniques de culture des bactéries prélevées dans les sols, une plus forte abondance de bactéries dénitrifiantes produisant de l'oxyde nitreux (N₂O), de bactéries réduisant le fer et les sulfates en utilisant l'acétate et les lactates et de bactéries méthanogènes dans les sols perturbés par rapport aux sols non perturbés.

Il semblerait aussi que la compaction, en plus de réduire la diffusion du méthane, modifie le potentiel biologique des sols à oxyder le méthane, c'est-à-dire à le "consommer". L'activité des bactéries méthanotrophes serait limitée principalement par l'humidité du sol qui est relativement augmentée par le tassement. Ainsi 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, gaz dont on sait qu'il joue un rôle très important dans « l'effet de serre ».

Si certaines études montrent la résistance des microorganismes au tassement, d'autres montrent que la biomasse et l'activité microbiennes diminuent suite au tassement. Deux spécialistes proposent d'expliquer ces divergences 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 ne seraient pas 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.

Quand les conditions d'aération du sol sont vraiment compromises par le tassement, il peut s'établir des conditions de vie anoxiques : le fonctionnement du sol change alors totalement (figure 2). Le potentiel d'oxydoréduction diminue et le

³ « La nécrose de l'hévéa enfin élucidée ». Fiche n° 221 de l'Institut de Recherche pour le Développement (IRD).

métabolisme anaérobie des micro-organismes du sol provoque la dissolution des oxyhydroxydes de fer et la migration des ions ferreux sous forme chélatée. Cette perte de fer (cation flocculant) dans les horizons supérieurs peut entraîner une augmentation de la dispersibilité des argiles à l'eau, du lessivage des argiles et de l'instabilité structurale.



Figure 2 : 9 ans après le passage d'un tracteur sur un limon très fertile en Lorraine. A gauche, le « témoin » non circulé est aéré, il comporte des radicelles en surface et des lombrics. Dans la « zone de bordure » (voir figure 1), à 50 cm du premier profil, un pseudogley s'est créé en surface avec un horizon « léopard ». La porosité en est toujours absente et la teneur en eau est de l'ordre de 2 fois celle du sol intact. On voit très nettement les traces blanches et ocres dues à la mobilité du fer réduit car sans O^2 , à l'inverse d'un fer rouillé. (Photo : ONF)

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 aérochyme, 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 aérochyme, 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), et beaucoup d'entre elles (notamment les Solanacées) sont d'origine nord-américaine, zone où les sols ne connaissent pas l'activité de labour et d'aération de nos vers de terre.

Pour une meilleure connaissance des conséquences du tassement

Peu d'études des effets à long terme du trafic forestier sur l'écosystème ont été réalisées. Il est ainsi difficile de cerner et de quantifier l'impact global du tassement sur la production forestière, l'émission de gaz à effets de serre et la fertilité des sols. De plus amples recherches *in situ* sont absolument nécessaires pour mieux cerner cette complexité d'interactions. Les nombreux facteurs qui jouent lors du processus de compaction nécessitent une définition rigoureuse des conditions dans lesquelles s'est effectué le tassement afin de pouvoir correctement généraliser les conséquences observées. Une coopération INRA/ONF vient de créer, en Lorraine, deux sites en forêt domaniale pour étudier ce que l'on peut appeler, soit les effets du tassement à long terme, soit la durée nécessaire pour que la porosité des sols et les fonctions associées soient restaurées.

Les deux sites présentent des sols similaires (limon sur argile, nappe perchée temporaire), qualifiés de « sensibles au tassement ». Leur richesse chimique est cependant assez différente laissant espérer une restauration naturelle plus facile ($pH \approx 5$) d'un côté que de l'autre ($pH < 4,5$). Une coupe rase de quelques hectares a été réalisée et débardée par câble dans les deux cas, puis les sols ont été tassés de manière contrôlée par un porteur Valmet de 25 t en charge. Les sites sont suivis à différentes échelles, par différentes équipes (aux savoir-faire spécifiques) et à différents pas de temps (tableau 2) afin de mieux comprendre la complexité des relations entre les différentes modifications et d'établir des liens entre variables faciles à relever sur le terrain et ces modifications.

En guise de conclusion

Le simple fait de chasser de 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.

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 teneur en air. 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.

Au final, empruntons à J. M. G. Le Clézio une phrase de son livre Ourania : « *Le sol est le "nœud" de l'écosphère, le sol sur lequel vous marchez, duquel vous mangez, le sol est votre peau, votre vie. Si vous ne le traitez pas bien, vous le perdrez, car un sol dégradé ne se récupère pas. Quand il est détruit, il faut des milliers d'années pour que la terre en invente un nouveau.* ».

Nous remercions pour son aide Noémie Goutal, ingénieure forestier doctorante à l'INRA

Pour en savoir plus

GOBAT J.-M., ARAGNO M., MATTHEY W.. 2003. Le sol vivant, 2ème edition. Presses Polytechniques et Universitaires Romandes. 568 p.

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 de l'ONF, 14, pp. 3-8.

RANGER J., BRETHES A.. 2008. Effet de la mécanisation des travaux sylvicoles sur la qualité des sols forestiers : dynamique de la restauration naturelle ou assistée de leurs propriétés physiques. Rapport de projet DST (Dégradation physique des sols agricoles et forestiers liée au tassement) - volet forestier. 37p.