

INTERACTIONS ENTRE LES EFFETS DU TASSEMENT PAR LES ENJUS D'EXPLOITATION ET LA FERTILITÉ CHIMIQUE DES SOLS FORESTIERS

JACQUES RANGER^a, ARNAUD LEGOUT^a – PASCAL BONNAUD^a – DOMINIQUE ARROUAYS^b –
GILLES NOURRISSON^a – DOMINIQUE GELHAYE^a – NOÉMIE POUSSE^c

LE CONTEXTE

Les sols forestiers sont différents des sols agricoles, à la fois dans leur typologie et leur fonctionnement biogéochimique, ceci malgré une origine commune (Badeau *et al.*, 1999). L'histoire a fait que, dès la sédentarisation humaine, la forêt a été progressivement cantonnée là où l'agriculture ne pouvait s'implanter aisément. De plus, les exportations minérales ont été fortes tant que le bois a été une source d'énergie majeure (domestique et industrielle), et jusqu'à l'apparition des engrais, les sols forestiers ont servi de ressource pour améliorer la fertilité des sols cultivés (transfert d'humus et de déjections animales) ; le phosphore au cycle très conservatif trace ces événements (Koerner *et al.*, 1997). L'amélioration des techniques, du matériel et des intrants chimiques, a permis de mettre en valeur des terrains ingrats (terres de landes, terres très calcaires), dont beaucoup retournent à l'état boisé. Les terres libérées par les déprises correspondent toujours aux sols les moins intéressants pour l'agriculture dans un territoire donné : pauvres pour l'agriculture, ils deviennent favorables pour la forêt, du fait du reliquat de fertilisation qu'ils contiennent ; toutefois, cette part de fertilité s'épuise progressivement et le nouvel équilibre sera réalisé en fonction des paramètres naturels de la fertilité, posant la question de la pérennité des fonctions.

La conséquence est que les sols forestiers sont le plus souvent organiques, acides et désaturés, c'est-à-dire pauvres en cations alcalins et alcalino-terreux, hydromorphes ou séchards, caillouteux, situés dans des zones pentues... (Badeau *et al.*, 1999 ; Arrouays et Ranger, 2014). Ils sont toujours plus hétérogènes que les terrains agricoles soumis aux instruments aratoires. Les espèces sont très différentes des cultures agricoles : plantes pérennes parfois très longévives, le plus souvent acidiphiles ou acido-tolérantes généralement grâce à la symbiose, peu améliorées génétiquement, sinon par sélection massale. Les pratiques sont spécifiques mais diversifiées, allant de la ligniculture intensive à courte rotation aux réserves, où les récoltes ne sont qu'entretien ou coupe sanitaire.

La majorité de la forêt française gérée ne constitue pas un « milieu naturel », mais conserve un fort degré de naturalité. Elle est traitée semi-extensivement, ce qui se traduit par des interventions lourdes pour les récoltes et les régénérations, puis par des interventions plus légères pour les éclaircies tous les 8 à 20 ans, avec peu voire pas d'intrants, pas même pour y restituer les exportations

a INRAE, Centre de Nancy Grand-Est, UR Biogéochimie des écosystèmes forestiers, 54000, Nancy, France
b INRAE Centre Val de Loire, Unité Infosol, 45000, Orléans, France
c ONF, Département R&D, 84000, Avignon, France

minérales, faibles si le seul bois fort est récolté, nettement plus fortes si la récolte concerne l'arbre entier (Ranger *et al.*, 2010).

La forte demande actuelle pour les produits forestiers, et le maintien de l'ensemble des services que rendent les forêts, posent la question de la pérennité de ces écosystèmes. Un éclairage sera fait ici sur les enjeux de la mécanisation généralisée des opérations sylvicoles, qui doit être maîtrisée et adaptée à chaque sol, de façon à ne pas dégrader sa structure physique, composante majeure de sa fertilité et de la durabilité de l'écosystème pour toutes ses fonctions.

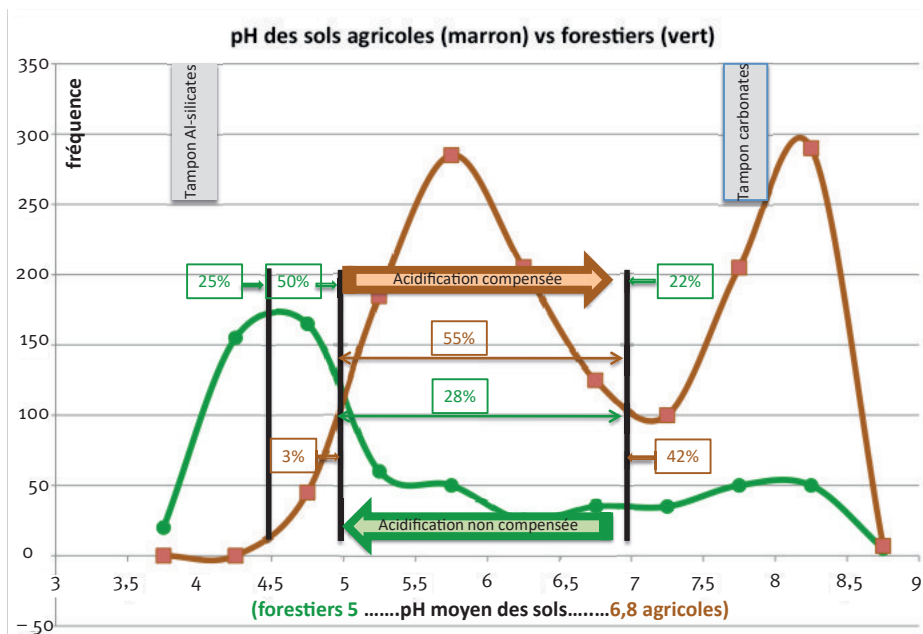
LA FERTILITÉ DES SOLS FORESTIERS

On sépare par commodité les trois composantes, physique, chimique et biologique, de la fertilité des sols, même si ces trois aspects interagissent étroitement.

La fertilité chimique des sols forestiers

Elle est limitée en valeur absolue puisque directement reliée au pH du sol, en moyenne acide. Les données du réseau systématique de mesure de la qualité des sols (RMQS) précisent les caractéristiques des sols forestiers dont le pH moyen est de 5, inférieur de 1,8 unité par rapport aux sols agricoles, et dont 25 % présentent un pH inférieur à 4,5 (figure 1, ci-dessous). La distribution des sols forestiers est caractéristique d'un milieu qui s'est progressivement acidifié : la classe proche

FIGURE 1 COMPARAISON DES SOLS AGRICOLES (courbe brune) ET FORESTIERS (courbe verte) POUR LEUR pH_{EAU}
 Courbes établies à partir des données du RMQS (base de données GIS sols Inrae Infosol Orléans).



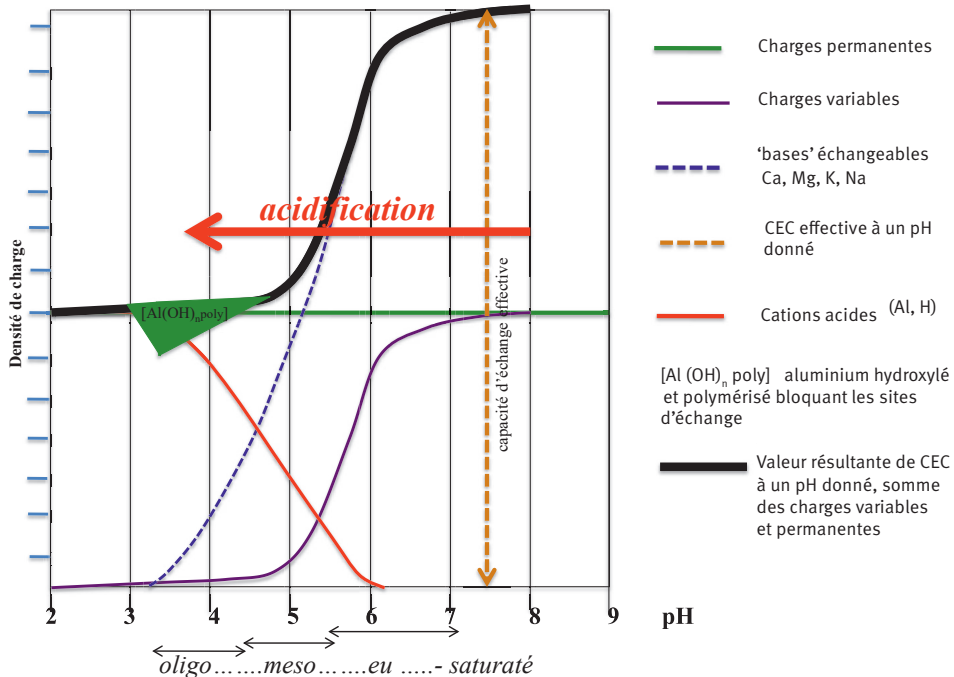
du tampon des carbonates est fortement réduite, la zone peu tamponnée entre pH 7 et 4,5 représente moins d'un tiers d'entre eux et le maximum se situe vers le tampon des silicates. Celle des sols agricoles est très différente, avec trois particularités remarquables :

- « aucun » sol n'a un pH < 4,5,
- le maximum se situe dans la zone peu tamponnée,
- la classe proche du tampon des carbonates est importante.

Les sols agricoles ne s'acidifieraient pas ? Au contraire et probablement plus que les sols forestiers, mais cette acidification est compensée soit par amendement calcaire ($5 < \text{pH} < 7$), soit par effet mécanique des instruments aratoires maintenant un taux élevé de calcaire actif (Julien et Dambrine, 2011).

Les conséquences sont directes pour la fertilité minérale des sols forestiers, puisque, pour un sol donné, la courbe de saturation en cations alcalins (K, Na) et alcalino-terreux (Ca, Mg) est directement reliée au pH (figure 2, ci-dessous) ; le niveau réel dépend de la réactivité de ses constituants (matière organique et argile). Les sites du complexe d'échange étant toujours occupés, ils le sont par des cations acides (Al et H) si le sol est désaturé. Les conséquences sont triples pour les plantes : faible disponibilité en éléments (oligotrophie), accès difficile aux éléments utiles raréfiés, toxicité éventuelle de l'aluminium trivalent.

FIGURE 2 RELATION ENTRE LE pH DU SOL, LA CAPACITÉ D'ÉCHANGE CATIONIQUE (CEC) ET SA SATURATION PAR LES CATIONS ALCALINS ET ALCALINO-TERREUX (K, Ca, Mg, Na) D'UNE PART, ET LES CATIONS ACIDES (Al et H) D'AUTRE PART

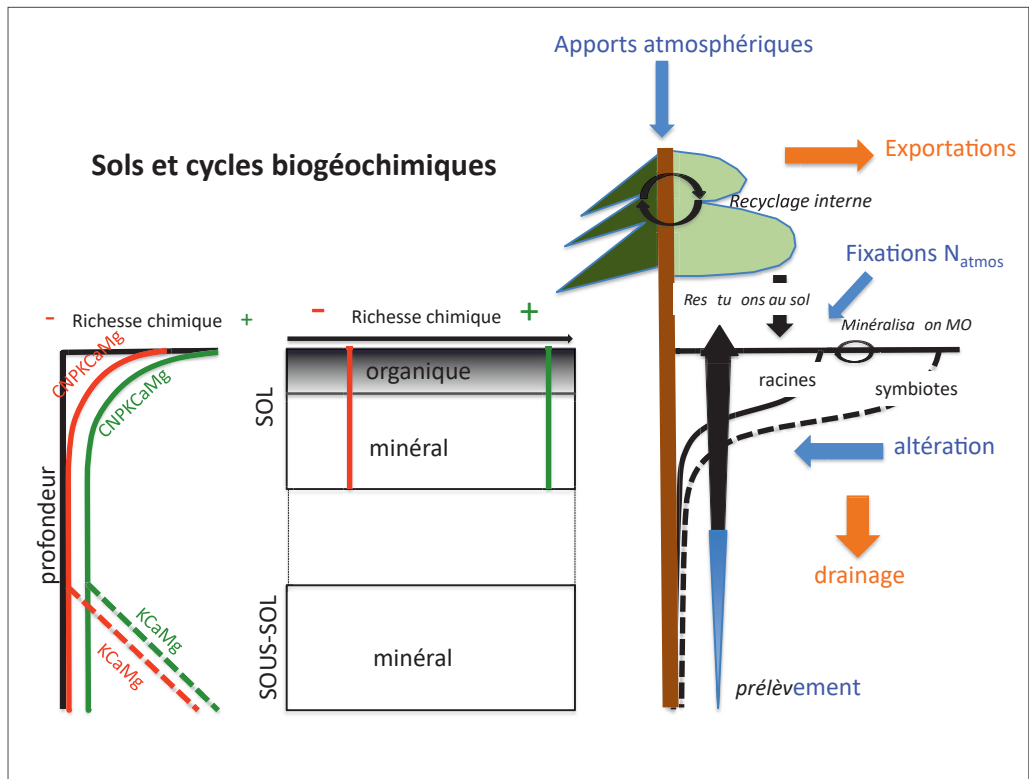


Malgré une biodiversité totale limitée, l'écosystème forestier s'est lentement adapté en optimisant l'utilisation des ressources disponibles pour produire la biomasse végétale (figure 3, p. 194).

La faible dimension du réservoir est compensée par un ensemble complexe de flux de recyclages et par des associations biologiques augmentant la prospection et faisant barrière aux éléments indésirables (Le Tacon, 2017). La biodisponibilité des éléments y dépasse largement le seul réservoir sol : ce dernier n'est que l'un des compartiments du système, dont le fonctionnement ne saurait être traité isolément (Ranger et Bonneau, 1984). La plante joue un rôle fondamental en prélevant, jusque dans le sous-sol et les fissures/fractures des roches, des éléments tel le calcium restitué en surface, éléments qui auraient probablement disparu des couches superficielles des sols les plus acides.

FIGURE 3 SCHÉMA MONTRANT L'ADAPTATION DU FONCTIONNEMENT DE L'ÉCOSYSTÈME À LA RICHESSE DU SOL FORESTIER

Ce fonctionnement est adapté à la distribution des éléments nutritifs concentrés dans les horizons de surface du sol mais existant pour certains dans le sous-sol (partie gauche), et à celle des racines, des symbiotes et des acteurs microbiologiques de la décomposition concentrés à la surface du sol (partie droite). Le cycle biogéochimique montre des flux entrants (flèches bleues), sortants (flèches brunes), et des flux internes au système (flèches noires). La couleur bleue et noire du flux de prélèvement indique que si le prélèvement se fait dans le sol, il s'agit d'un flux interne, et s'il est issu du sous-sol ou de fissures, il devient une entrée du système, posant la question complexe de la limite de l'écosystème.



Ces adaptations sont très efficaces et conduisent à l'idée communément admise, que les forêts seraient très frugales. Cette frugalité n'est qu'apparente, car les besoins annuels d'un peuplement forestier sont élevés. Cependant ils sont compensés par des restitutions massives, tels les retours au sol par les litières, le large recyclage interne à la plante, la capture d'éléments atmosphériques, parfois la substitution d'éléments pour des fonctions non spécifiques (par exemple, Na se

substituant à K) (Raposo Almeida *et al.*, 2010). Les associations symbiotiques (mycorhizes et bactéries associées aux racines des végétaux) favorisent la disponibilité des éléments nutritifs pour la plante, par des activités spécifiques (excrétions), et par la forte augmentation de la prospection du sol (facteur 1 000 à 10 000). Les fixateurs biologiques d'azote (bactéries associées aux racines ou libres dans la litière) interviennent aux différents stades de développement des peuplements. Le prélèvement d'eau et d'éléments dans les couches profondes du sol et du sous-sol pallie les stress superficiels (Bedel *et al.*, 2016a ; Ranger, 2017). Ces processus sont communs aux feuillus et aux conifères pour lesquels le rapport immobilisation/besoins totaux est toujours situé autour de 10 % pour N, P et K (Ranger, 1981 ; Ranger *et al.*, 1995, 1997). Sans en modifier la tendance, l'intensification de la sylviculture augmente ce ratio puisque les espèces tendent à être plus exigeantes, les apports plus élevés et l'âge de récolte plus jeune : il se situe vers 20 % pour les taillis à courte rotation de Peuplier (Berthelot *et al.*, 2000) et vers 30 % pour l'Eucalyptus traité à courte rotation (Laclau *et al.*, 2003).

La fertilité du sol forestier réside dans cette dynamique des cycles biogéochimiques et non dans la dimension d'un réservoir statique. Ces flux, mettant en jeu des quantités d'éléments adaptées aux besoins des végétaux mais limitées en valeur absolue, conduisent à des systèmes performants mais vulnérables. Ceci est d'autant plus vrai que le sol est pauvre, situation où les cycles biologiques (restitutions par les litières) et biochimiques (translocations internes) ont une importance relative très forte par rapport au cycle géochimique (apports atmosphériques, altération des minéraux) (Legout *et al.*, 2014).

Contrairement aux végétaux agricoles, les arbres se nourrissent à partir d'au moins quatre sources : le sol, le sous-sol, l'atmosphère et leurs propres « réserves ».

L'accès à ces différentes sources est fondamental dans le temps et dans l'espace, et toute rupture peut compromettre l'ensemble des fonctions de l'écosystème :

- les apports atmosphériques ne sont pas que des polluants. À dose modérée, ils représentent un fertilisant indispensable à la production (Bonneau et Nys, 1993) ;
- les litières restituent en se minéralisant l'essentiel du prélèvement au sol (de 55 à 80 % pour l'azote ; de 30 à 80 % pour le phosphore) : l'exportation des litières et des rémanents élimine une partie du pool actif du système (Achat *et al.*, 2015) ;
- les translocations internes d'éléments des organes âgés vers les tissus jeunes fonctionnels, très actives au début de la saison de végétation, sont mobilisées en cas de stress dont la répétition affaiblira l'arbre qui devient plus sensible aux ravageurs (Kramer et Kozłowski, 1960) ;
- le prélèvement dans les couches profondes du sol, voire du sous-sol, constitue une voie importante pour l'alimentation en eau et en quelques éléments des arbres (Drouet *et al.*, 2015 ; Christina *et al.*, 2016 ; Bedel *et al.*, 2016a) : toute contrainte le limitant exposera l'arbre aux stress hydrique et nutritif en période de sécheresse. Ce point capital est méconnu et négligé dans la majorité des modèles scientifiques.

Fertilité physique des sols forestiers et mécanisation des opérations sylvicoles

Le sol forestier est organisé à toutes les échelles spatiales : verticalement en horizons, dont la zonation résulte d'un long processus de fonctionnements biologique et géochimique dans un environnement donné passé et actuel et, horizontalement dans chaque horizon où la structuration se traduit par des agrégats plus ou moins stables en fonction des constituants du sol, organiques et minéraux, des acteurs biologiques, et de leur pH (Duchaufour, 1977). Cette organisation détermine leur potentiel de fertilité et leurs fonctions, puisque gérant la rétention en eau et en éléments nutritifs, le transfert des fluides, et les niches biologiques.

La mécanisation des opérations forestières représente un risque majeur pour l'avenir des sols et des écosystèmes en cas de perturbation de cette organisation fonctionnelle. En 2019, cette mécanisation concernait environ 85 % des opérations sylvicoles en forêt résineuse contre seulement 15 % en forêt feuillue (Pischedda, communication personnelle).

La typologie des dégâts liés à la mécanisation a été décrite par Rotaru (1983) : le scalpage des horizons superficiels qui élimine les couches organiques riches en nutriments et en biodiversité pouvant déclencher le processus érosif après élimination du « mulch », l'orniérage issu du fluage du sol soumis à une pression, alors qu'il est saturé d'eau, et le compactage résultant d'une augmentation de masse à volume constant, réduisant la porosité du sol. Les deux derniers processus modifient le transfert des fluides (eau et gaz). On peut y ajouter le mélange des horizons. Ces perturbations altèrent le fonctionnement biogéochimique des sols et des écosystèmes, et leurs fonctions.

La sensibilité des sols forestiers à la compaction dépend de leur structure, de leur texture et surtout de leur état hydrique au moment de l'application de la contrainte. Le guide Prosol (Pischedda *et al.*, 2009) conclut que tout sol sec est résistant, que tout sol très humide est très sensible au tassement, mais que pour des humidités intermédiaires, ce sont les sols limoneux qui sont les plus sensibles. Les limons sont des matériaux géologiques dominés par les particules dont la dimension est comprise entre 2 et 50 µm, qui n'ont ni les propriétés colloïdales des argiles granulométriques, ni la surface spécifique développée par les argiles minéralogiques. Le quartz fin, souvent dominant, limite la cohésion entre particules : la structure du sol devient instable, et ceci d'autant que le pH est acide, car les ions alcalino-terreux flocculant sont peu représentés, la matière organique perd de sa réactivité car protonée voire hydrophobe, et l'activité biologique est limitée. De très nombreux sols possèdent une couche limoneuse parfois mince en surface, issue d'un épannage périglaciaire, couche que le travail mécanique du sol a fait disparaître en sol agricole par homogénéisation, mais qui est bien présente en sol forestier où son influence est importante [le cas des pélosols différenciés est bien connu en région Grand Est (Lorraine)].

En forêt, la réversibilité des dégâts est un enjeu crucial. Contrairement aux sols cultivés, la restauration de la porosité du sol forestier n'est le fait que des processus naturels : gel-dégel, humectation-dessiccation, perforation par les racines et les animaux fousseurs, fissuration par le prélèvement d'eau. Les vers de terre anéciques, contributeurs majeurs à la création de macropores, proportionnels au taux de Ca dans le sol (Hobbie *et al.*, 2006), diminuent fortement avec le pH, disparaissant en deçà de pH 4,5 (25 % des sols forestiers métropolitains).

Le décompactage par travail mécanique du sol forestier est problématique : rémanents, souches, blocs rocheux sont des obstacles techniques, le brassage répété des horizons produirait un déstockage de carbone organique, et l'opération a un coût élevé. Par ailleurs, le problème du compactage des horizons profonds ne serait que très partiellement résolu et certaines fonctions majeures assurées par les sols demeureraient altérées. De plus, pour être efficace, le travail du sol doit être réalisé dans des conditions satisfaisantes d'humidité, sous peine d'aggraver la situation.

La restauration du sol est un processus lent dont il est peu probable qu'il soit totalement réversible, y compris pour les horizons superficiels des sols. Le tassement des horizons profonds est encore plus durable, augmentant l'hypoxie et l'hydromorphie, mais aussi la discontinuité verticale des propriétés physiques dommageables à la prospection racinaire. Il expose l'arbre au risque de stress physique en saison humide et hydrique et nutritif en saison sèche. Les observations de Christina *et al.* (2016) en zone tropicale et Drouet *et al.* (2015) ou Bedel *et al.* (2016a) en milieu tempéré montrent que les racines profondes permettent aux arbres de s'alimenter en eau et en éléments en période sèche. L'augmentation de la fréquence des épisodes climatiques extrêmes amplifiera les mécanismes décrits ci-dessus, aggravant les conséquences pour les peuplements se développant sur sol tassé.

LA NÉCESSITÉ D'ACQUISITION DE CONNAISSANCES DANS LE DOMAINE DE L'EFFET DES CONTRAINTES PHYSIQUES AU SOL

Les connaissances sont très déficitaires dans le domaine des conséquences de la mécanisation sur la dégradation physique des sols et surtout sur la dynamique de leur restauration. Les

conclusions aléatoires tirées de données collectées sur des parcelles dont on ne connaît pas l'historique ont conduit au développement d'expérimentations contrôlées afin de pouvoir tirer quelques conclusions étayées scientifiquement.

Apport des sites expérimentaux suivis sur le moyen terme

• Description des sites

Deux expérimentations ont été menées sur les forêts feuillues de la Plaine Lorraine, coupées à blanc et débardées par câble-mât, évitant les dégâts au sol (Ranger *et al.*, 2015). La recherche concerne la dégradation par un engin de débardage de sols sensibles ressuyés, soumis à un tassement modéré (perte d'altitude moyenne de 5 à 7 cm n'excluant pas localement des ornières plus profondes aux extrémités des placeaux, quand le matériel a dû manœuvrer) (Goutal *et al.*, 2013b). Leur suivi intensif apporte des informations rares sur leur dynamique de restauration à moyen terme.

Deux sols analogues sur le plan physique ont été retenus. Il s'agit de « sol bruns lessivés » (Néoluvisols ruptiques) polyphasés composés d'une couche limoneuse de 50 à 60 cm d'épaisseur, reposant sur une argile lourde, créant une forte rupture granulométrique : limons reposant sur l'altérite argileuse du Keuper à Azerailles (Meurthe-et-Moselle) (AZ), ou sur des argiles de l'Albien-Cénomaniens à Clermont-en-Argonne (Meuse) (CA). Ces sols ne sont pas hydromorphes même si quelques traces apparaissent localement au contact argile-limon. Les différences notables concernent le taux (10 points) et la nature des argiles, et le pH des horizons de surface (pH < 4,5 pour CA et pH > 4,5 pour AZ).

Plusieurs traitements ont été réalisés :

Témoin (C)

Tassé (T)

Tassé puis Décompacté (TD) par cover-crop sur 20 cm environ

Potets (P) : tassé puis décompacté localement autour du plant sur 50 cm de profondeur ; ici sans drain reliant les potets entre eux

Amendé (A)

Tassé Amendé (TA) pour le sol le plus pauvre d'Argonne (l'amendement initial a été de 450, 250, et 300 kg/ha, respectivement pour Ca, Mg et K), répétés dans trois blocs (plan du dispositif d'Azerailles, figure 4, p. 198 et vue aérienne en 2012, figure 5, p. 198).

Le tassement a été réalisé par un porteur forestier (VALMET 840, 8 roues motrices jumelées en boggie, avec berceau sur les 4 roues arrières pesant 11 t à vide et en charge, 23 t AZ et 17 t CA) ; les pneumatiques (600/55 × 26,5) étaient gonflés à une pression de 360 kPa et l'équivalent de deux passages ont été effectués sur la bande tassée en plein (figure 6, p. 199). Cette solution permet de travailler sur des séquences allant d'un témoin pur, au sol tassé mais jouxtant le témoin (restauration rapide par colonisation latérale), jusqu'au sol tassé isolé dans un environnement tassé (restauration à partir de quelques niches telles les souches).

• Résultats à court et moyen terme

Les résultats présentés concernent les effets initiaux du tassement sur le sol et la végétation spontanée, et celle de la restauration du sol évaluée par différents indicateurs : la physique du sol, la nappe perchée temporaire, les solutions du sol non saturé, les gaz du sol, la macrofaune lombricienne, et la végétation.

Effets initiaux

Ils sont ici évalués pour une période de six mois à un an après le passage du porteur.

FIGURE 4 VUE AÉRIENNE DU SITE D'AZERAILLES (MEURTHE-ET-MOSELLE) EN 2012

(traitements : C témoin, T tassé, D tassé et décompacté Cover Crop, et P tassé et décompacté 'potets'; I, II, III numéros des blocs). La différence de végétation spontanée en fonction des traitements apparaît dans les nuances de verts : vert lumineux → jonc et glycérie (tassés) ; vert foncé → ronces (témoins).

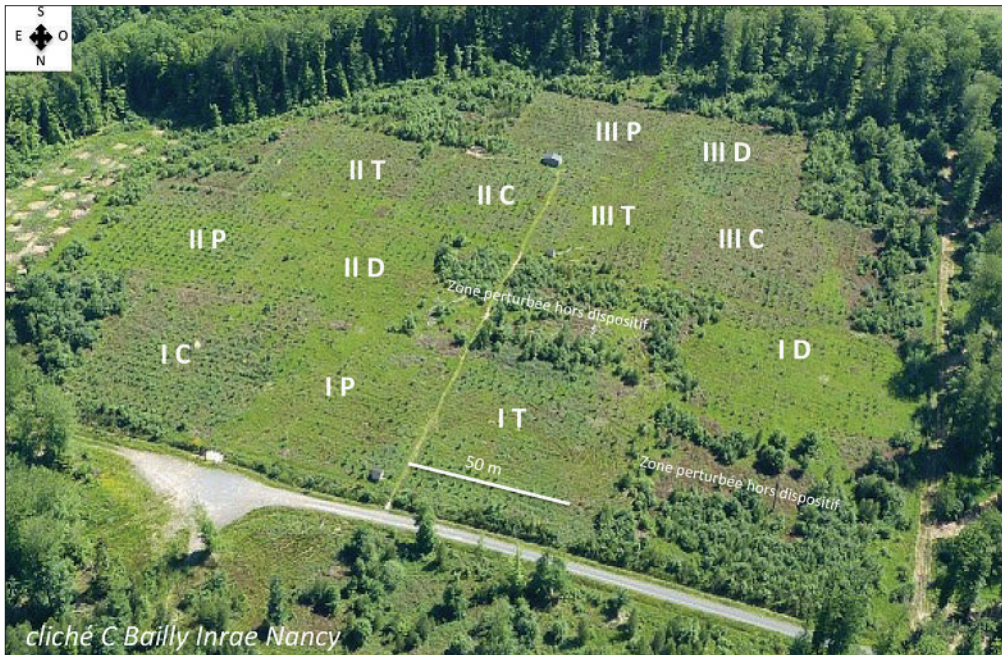


FIGURE 5 PLAN DU DISPOSITIF DE LA FORÊT DOMANIALE DES HAUTS-BOIS, COMMUNE D'AZERAILLES (MEURTHE-ET-MOSELLE)

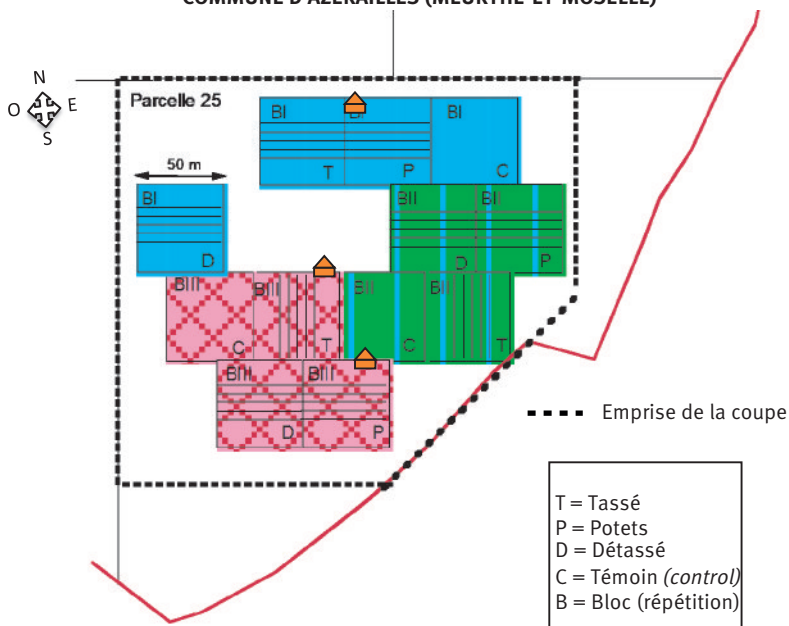
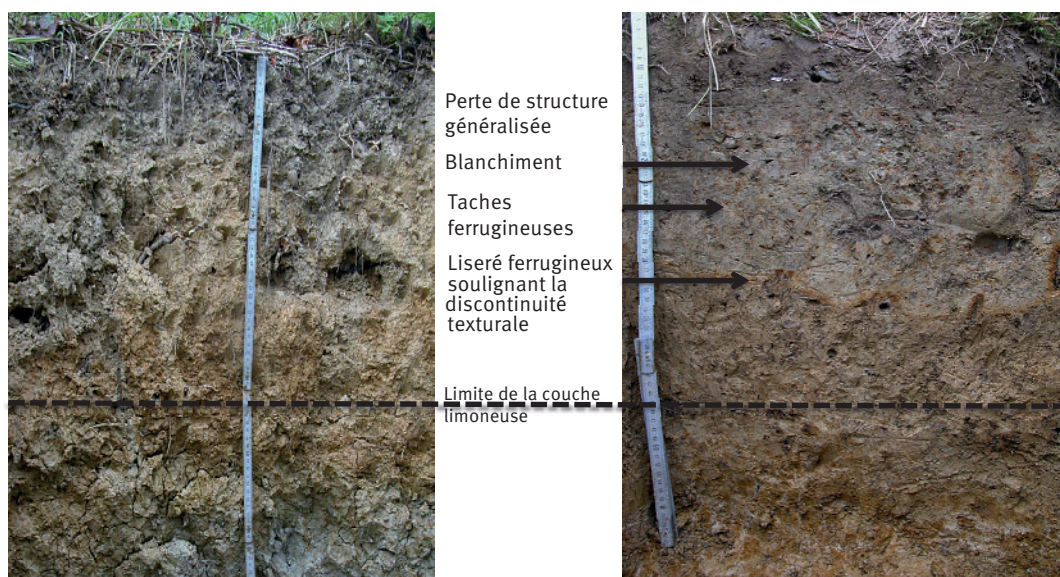


FIGURE 6 RÉALISATION DU TASSEMENT PAR LE PORTEUR VALMET DE L'ENTREPRISE LECOMTE SUR LE SITE D'AZERAILLES (A), ET RÉSULTAT DU TASSEMENT SUR LE SOL APRÈS UN PREMIER PASSAGE (B) ET UN SECOND DÉCALÉ D'UNE DEMI-LARGEUR DE PNEUMATIQUE, DE FAÇON À COUVRIR AU MIEUX TOUTE LA SURFACE ET RÉSORBER LES BOURRELETS (C)



La dégradation de la structure physique des sols des deux sites a été très rapide : en quelques mois, le sol sain présentait des traits hydromorphes jusqu'en surface (perte de structure, décolorations, taches, lisérés ferrugineux) ; le fer et le manganèse, devenus mobiles en conditions hydriques saturées et déficitaires en oxygène, se déposent dès que le milieu redevient oxygéné (macropores restants, fissures, gainage autour des racines) (figure 7, ci-dessous).

FIGURE 7 AZERAILLES - MORPHOLOGIE DU SOL SAIN (à gauche) ET DU SOL TASSÉ (à droite), EN JUIN 2013



La densité apparente du sol a fortement augmenté en surface (de 20 à 30 %) et de façon plus limitée avec la profondeur, attestant d'une forte réduction de la macroporosité. En moyenne, celle-ci représentait 40 % de la porosité totale (AZ) et 48 % (CA), diminuant de 70 % dans le premier cas et de 56 % dans le second (Bonnaud *et al.*, 2019).

Tout le fonctionnement du sol a été immédiatement modifié par le tassement :

- la réduction de la conductivité hydraulique du sol conduit en surface à l'augmentation de l'humidité en période humide, et à une diminution en période sèche, tendance inverse en profondeur, puisque l'eau ne s'infiltré que difficilement (Goutal-Pousse *et al.*, 2014) ;
- envahissement de la nappe perchée temporaire plus important dans le sol (+ 9 cm par rapport au plancher AZ et 8 cm CA) et plus durable (+ 32 jours AZ et 23 CA) ; nappe qui s'enrichit en composés réduits du fer, du manganèse et du soufre (Bonnaud *et al.*, 2019) ;
- forte modification de l'atmosphère du sol : l'oxygène peut être totalement consommé durant certains épisodes au cours desquels le CO₂ augmente corrélativement (Goutal *et al.*, 2013a) ;
- l'émission de gaz à effets de serre change : les flux de CO₂ diminuent après tassement suite à la réduction de l'activité biologique aérobie (Goutal *et al.*, 2012) et des émissions épisodiques de méthane apparaissent (Epron *et al.*, 2016) ;
- modification de la chimie des solutions collectées en période de sol non saturé : les concentrations augmentent (AZ), mais diminuent (CA), en relation avec l'immobilisation ou non des nitrates produits (Ranger *et al.*, 2020) ;

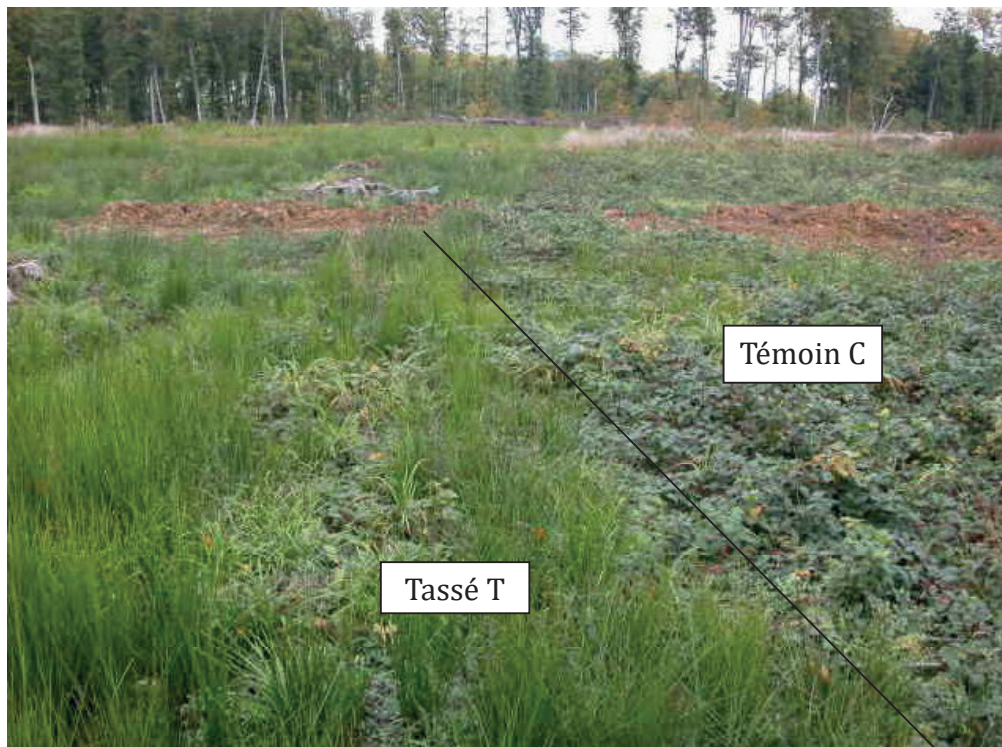
– disparition des lombrics anéciques, dont la population passe de 60 à quelques individus au m² (AZ) ; à Clermont-en-Argonne, les vers anéciques sont initialement pratiquement inexistant compte tenu de l'acidité du sol (Capowiez *et al.*, 2015) ;

– la végétation a fortement réagi avec le développement du jonc invasif dans le sol le plus riche (AZ) (figure 8, ci-dessous), entraînant une forte mortalité des jeunes plants de Chêne, ce qui a conduit à deux regarnis et à des dégagements annuels coûteux pour en assurer la survie. La végétation a été peu perturbée dans le sol le moins fertile (CA) où le développement des ligneux a explosé.

FIGURE 8

**MODIFICATION DE LA VÉGÉTATION SPONTANÉE,
QUELQUES MOIS APRÈS LE TASSEMENT SUR LE SITE D'AZERAILLES**

(la ronce domine dans la zone témoin C, alors que le jonc a envahi la zone tassée T)



La dynamique de restauration du sol forestier et de ses fonctions

La dynamique de restauration est très lente, comme en attestent plusieurs indicateurs :

– La morphologie du sol : les observations régulières depuis dix ans indiquent que la restauration évolue lentement, surtout en surface, où le développement de la végétation et la lente reprise de l'activité biologique tendent à démanteler les zones blanchies et redonnent une certaine structure au sol. C'est dans le sol le plus pauvre que la restauration a été la plus rapide, sachant que la structure y demeure de très mauvaise qualité.

– La résistance physique du sol (Pousse *et al.*, 2021 soumis) : cet indicateur corrélé à la densité apparente du sol est facile à utiliser car sa mesure par pénétrométrie est peu invasive. L'effet

du tassement sur ce paramètre varie très fortement avec le sol et avec son état d'humidité. Dans le sol le plus riche (AZ), l'effet de la compaction apparaît quelle que soit l'humidité, et le retour aux valeurs du témoin est observé au bout de 10 années. Dans le sol le moins fertile (CA), qui montre un comportement de type « hardsetting », caractérisé par une structure qui s'effondre à l'état humide et qui prend en masse à l'état sec, aucune évolution n'apparaît 10 années après la compaction, mais l'effet du tassement ne s'y manifeste qu'à l'état sec. Très intéressant est l'effet de l'amendement qui conduit en 10 ans à la restauration de la résistance physique du sol d'Argonne, probablement de manière directe grâce à l'apport d'ions floculants, et indirecte par une amélioration biologique (de la végétation aux micro-organismes).

– La nappe perchée temporaire (NPT) (Bonnaud *et al.*, 2019) : après une forte augmentation initiale de la fréquence, de la durée et du niveau atteint dans le sol, la NPT évolue différemment dans les deux sites. Pour Azerailles, la situation du témoin tend à s'améliorer probablement *via* le développement du peuplement, alors que celle du traitement tassé se détériore. À Clermont-en-Argonne, c'est l'inverse puisque durée et niveau augmentent légèrement dans le témoin mais diminuent dans le traitement tassé ; la situation s'améliore, même si elle est légèrement masquée par une augmentation de la pluviométrie hivernale, figure non observée à Azerailles.

La géochimie, contrôlée par le temps moyen de résidence (TMR) de la NPT, montre une forte augmentation de fer, manganèse et soufre réduits, ainsi que du carbone organique dissous. Une forte interaction apparaît avec les caractéristiques du sol puisque c'est dans le sol pauvre, où le TMR est le plus faible, que la concentration des éléments réduits est la plus forte : l'anoxie s'y mettrait beaucoup plus vite en place et les constituants y seraient plus sensibles.

– La solution du sol facilement absorbable par la végétation (Ranger *et al.*, 2021 soumis) : bien que fortement réactif aux modifications du fonctionnement actuel du sol, cet indicateur est complexe à interpréter car résultant d'un bilan production-consommation. La dynamique des anions contrôlant les cations est centrale, dans le cas présent celle du nitrate : immobilisé dans le sol le plus riche (AZ) mais pas dans le plus pauvre (CA) après la coupe à blanc, il augmente après tassement dans le plus riche, mais diminue drastiquement dans le plus pauvre. La perturbation par tassement diminue la production et l'immobilisation des nitrates, mais augmente la dénitrification dans les deux cas, conduisant à une résiduelle opposée ! Le traitement d'amendement augmentant le pH au dessus de 4,5 produit une immobilisation immédiate du nitrate, confirmant la pertinence de cette valeur seuil du pH pour le fonctionnement biogéochimique des sols, déjà bien connue pour la chimie de l'aluminium. Le chaulage compense partiellement l'effet du tassement.

– Les gaz :

– l'émission de gaz à effets de serre (GES) : les émissions de CO₂ après tassement varient en fonction des saisons, plus fortes pendant la saison humide mais plus faibles pendant la saison plus sèche, en relation avec l'activité biologique (Goutal *et al.*, 2012). Les émissions de méthane sont de nature plus épisodiques et plus difficiles à quantifier. Le tassement induit une augmentation de la fixation nette de méthane par le sol quand la végétation totale est prise en compte (mesure uniquement à AZ) (Epron *et al.*, 2016 ; Plain *et al.*, 2019).

– les gaz du sol : la diminution initiale drastique des coefficients de transfert des gaz traduit la perte de macroporosité (Goutal *et al.*, 2013a). La fissuration du sol tassé dès la période sèche diminue la contrainte, sans que la porosité construite ne soit pour autant régénérée. La restauration de l'atmosphère du sol diminue nettement avec la profondeur et devient faible à partir des horizons moyens (30 cm). Tous les horizons attestent d'un effet du tassement six années après l'application de la contrainte, bien que la tendance soit à une meilleure restauration en surface pour le sol le plus riche (AZ) que pour le plus pauvre (CA).

– La biologie :

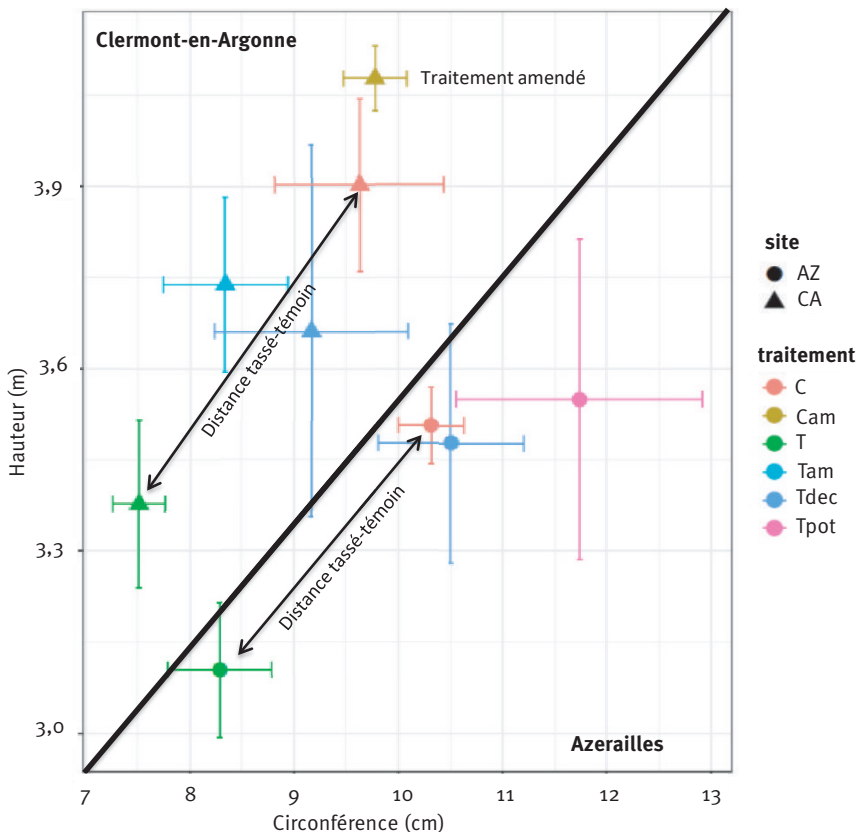
– la végétation spontanée : à Azerailles, l'invasion du jonc (*Juncus effusus* puis *Juncus conglomeratus*) et de la glycérie (*Glyceria striata*) perdure 10 années après tassement, régressant avec la

fermeture du couvert. Celle-ci est retardée par la perte de croissance et la mortalité des plantations, les ligneux ne se développent qu'après 7 à 8 années. Le site d'Argonne, peu affecté par le changement de végétation spontanée, a vu une explosion des ligneux dans tous les traitements (saules, bouleaux, trembles, érables), dégagés à plusieurs reprises. Le déterminisme des modifications de la végétation spontanée est spéculatif, mais les conséquences sont lourdes pour les futurs peuplements.

– les plantations forestières : le tassement contraint plus ou moins fortement les plantations, en raison de nombreux paramètres, l'état hydrique du sol lors de la mise en terre, la qualité des plants et de la plantation, le développement de la végétation spontanée, les regarnis, les dégagements,... C'est dans le sol le plus riche (AZ) que la concurrence a été la plus forte : mortalité nécessitant deux regarnis et plusieurs dégagements, déficit de végétation ligneuse gagnant l'essence cible, hétérogénéité spatiale de la croissance des plants.

FIGURE 9a CIRCONFÉRENCES ET HAUTEURS DES PLANTS DE CHÊNE SESSILE 8 ANS APRÈS TASSEMENT SUR LES SITES D'AZERAILLES (MEURTHE-ET-MOSELLE) (à droite) ET DE CLERMONT-EN-ARGONNE (MEUSE) (à gauche)

AZ = Azerailles ; CA = Clermont-en-Argonne ; C = témoin ; Cam = témoin amendé ; T = tassé ; Tam = tassé et amendé ; Tdec = tassé et décompacté avec un cover crop ; Tpot = tassé et décompacté avec un sous-soleur multifonction en potet



Après 10 ans, la croissance ne diffère plus entre les traitements, mais le retard initial est important, tant sur la hauteur que sur le diamètre, la forme des arbres et la distribution spatiale des tiges d'avenir. La relation hauteur-circonférence après huit années de végétation montre que les arbres du sol le plus pauvre sont plus hauts, mais de plus petit diamètre que ceux du sol le plus riche ; le travail du sol en plein a un effet limité peu significatif (figure 9a, p. 203). À Clermont-en-Argonne, l'effet de l'amendement est net sur la croissance (meilleur traitement pour tout critère incluant la variabilité), compensant de plus partiellement les effets négatifs du tassement. À Azerailles, le détasement localisé (potets indépendants) conduit à des arbres plus trapus que dans le témoin, cet effet perdure à 11 ans, avec l'amorce d'un décrochement de la croissance en hauteur. Un suivi attentif permettra de vérifier si l'effet bénéfique moyen des potets s'amortit avec le temps, à cause de systèmes racinaires mal conformés et cantonnés dans un espace insuffisant (effet container ?) (figure 9b, ci-dessous). La figure 10 (p. 205) illustre l'allure des plants après quatre années du traitement tassé à Azerailles : les plants du sol tassé montrent des systèmes racinaires plus courts que dans le témoin, avec un déficit de pivot vertical et une allure plagiotrope (Fatré, 2012).

FIGURE 9b

**CIRCONFÉRENCES ET HAUTEURS DES PLANTS DE CHÊNE SESSILE
11 ANS APRÈS TASSEMENT SUR LE SITE D'AZERAILLES**

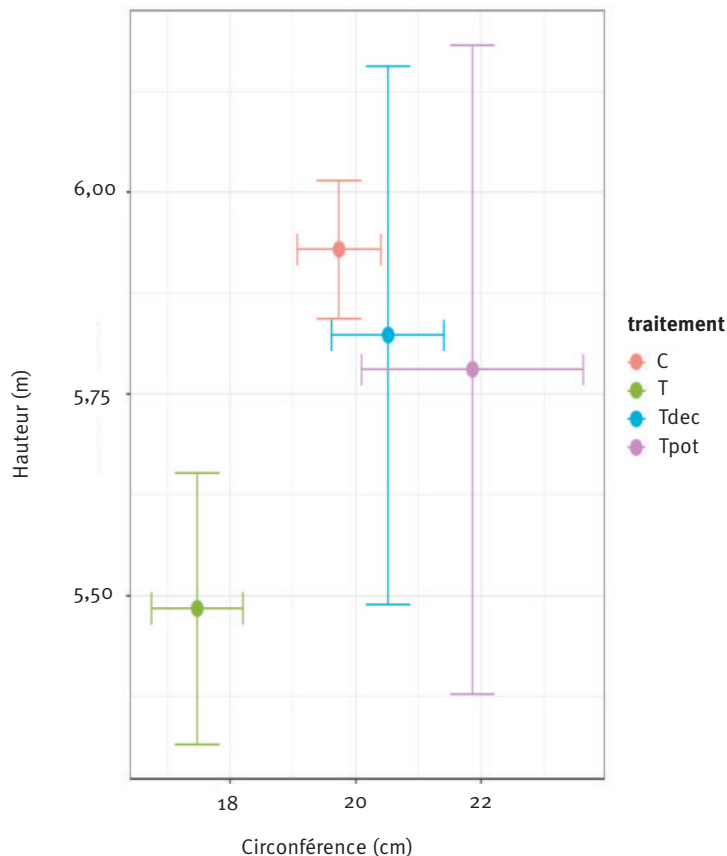


FIGURE 10 SYSTÈME RACINAIRE D'UN PLANT DE CHÊNE DU TÉMOIN C (A photo de gauche)
 ET D'UN PLANT DU SOL TASSÉ T (B photo de droite).
 SITE D'AZERAILLES – PLANTS DE CHÊNE SESSILE DE 4 ANS



– la faune lombricienne du sol : décimée par l'action mécanique du tassement, les lombrics ne recolonisent que très lentement le sol. Quatre années après le tassement, la recolonisation est la plus avancée dans le sol le plus pauvre (CA), mais il s'agit de vers épigés, sans rôle majeur pour la structure du sol. L'amendement (CA) avait entre autres pour objectif de dynamiser la population lombricienne : le résultat est positif, mais ce sont les vers épigés présents qui en ont bénéficié. À Azerailles, sept années après le tassement, la population de vers anéciques juvéniles est en forte progression dans le sol superficiel, mais la colonisation des horizons sous-jacents n'a toujours pas eu lieu (Capowiez *et al.*, 2015).

– l'étude du spectre microbiologique du sol d'Azerailles a été réalisée par l'approche *metabarcoding* sur les gènes de l'ARNr 16S et 18S obtenus par séquençage. Les résultats montrent un impact toujours significatif du tassement sur la composition des communautés microbiennes étudiées et sur leurs fonctions potentielles en fonction de la profondeur, six années après la perturbation physique du sol (Changey *et al.*, 2019).

Que tirer de ces observations ?

- Les données recueillies sur les deux sites expérimentaux démontrent la brutalité des changements et la lenteur de la restauration naturelle du sol.
- La restauration ne saurait être jugée par un seul indicateur : chacun d'entre eux se caractérise par une échelle d'intégration du système. Par exemple, la résistance physique d'un horizon, l'atmosphère locale du sol, la géochimie de la solution d'un horizon de sol, la colonisation d'un horizon par les lombrics, rendent compte essentiellement de la partie de sol où le paramètre a été mesuré. À l'inverse, la nappe perchée temporaire, très corrélée à la densification des horizons profonds qui régule le transfert vertical de l'eau, ne donnera que peu d'informations sur la restauration des horizons de surface. Au total, c'est la végétation arborée qui fournit le meilleur critère intégratif de la restauration du sol, puisque les arbres prélèvent leurs éléments dans les couches du sol et du sous-sol, en fonction de leur état hydrique et de leur accessibilité.

- L'hypothèse « intuitive » d'une restauration la plus rapide en sol riche n'est pas directement validée par nos observations. Tout se passe comme si le tassement avait une influence relative plus limitée dans le sol pauvre que dans le sol plus riche :

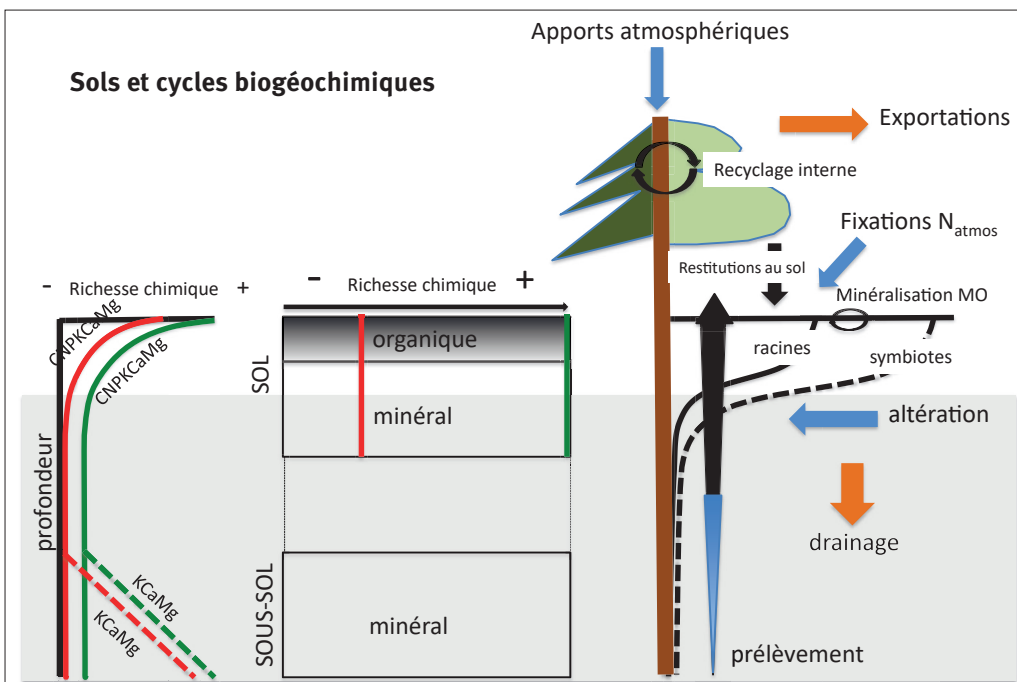
- Le tassement a modifié des caractéristiques qui peuvent évoluer rapidement, car sans grand éloignement de l'état initial. Par exemple, la morphologie s'est rapidement dégradée dans les deux sites, mais c'est dans le sol le plus pauvre que la réversibilité a été la plus rapide : l'hypothèse est que la structure très instable y favorise initialement la dégradation en sol humide et qu'ensuite la restauration, toute relative par ailleurs, se produit dès qu'un dessèchement apparaît, favorisant la fissuration physique.

- Le tassement dans le sol pauvre peut apparaître pratiquement sans effet, puisque le comportement dépend de critères intrinsèques difficiles à modifier : c'est le cas de la structure et de la résistance physique, où le comportement « hardsetting » demeure dans le sol pauvre après tassement (CA), masquant largement l'effet du traitement dans certaines conditions : c'est ainsi que six mois après le tassement, la différence de résistance physique entre le témoin et le sol tassé n'est pas significative car le sol est humide, mais trois ans après le tassement (en juin 2011), elle l'est très fortement quand le sol est sec ! Aucune évolution n'a lieu après 10 ans, traduisant cependant un effet durable, mais uniquement décelable en sol sec.

- Le sol dégradé se restaure lentement à partir de la surface, en recréant une porosité d'abord par voie physique puis biologique : c'est le cas du sol le plus riche (AZ) pour la résistance physique, les fluides du sol et la recolonisation des lombriciens.

FIGURE 11 **RISQUE À LONG TERME DU TASSEMENT D'ANNIHILER POUR PARTIE LE PROCESSUS COMPLEXE DES CYCLES BIOGÉOCHIMIQUES, ET D'AMPLIFIER DES STRESS, MÉCANIQUE EN SOL HUMIDE, NUTRITIONNEL EN SOL SEC**

La légende est celle de la figure 3 à laquelle il faut ajouter la zone grisée où les racines ne peuvent pénétrer que difficilement, mettant les arbres en difficulté (stabilité mécanique en période humide, alimentation en eau et éléments en période de sécheresse)



- Malgré une proximité des sols dans la classification, leur comportement est notablement différent. La quantité et la nature des argiles, indirectement responsables de la différence d'acidité de surface, jouent un rôle majeur (Bedel *et al.*, 2016b).
- L'amendement à faible dose du sol le plus pauvre produit des effets immédiats et à moyen terme très importants ; la croissance des plantations en atteste de manière très significative.
- Les observations devraient être poursuivies pour identifier les effets à plus long terme. Il est impossible de prévoir le retour à un état pré-perturbation.
- Une grande inconnue est l'effet de tassements répétés (réversibilité, tassement des horizons profonds) qu'aucune expérimentation ne permet actuellement de qualifier. Les indicateurs nappe perchée temporaire et végétation arborée alertent sur le décompactage des horizons profonds et sur les effets à plus long terme des différents traitements (Delage, 2020) (figure 11, p. 206).

PRISE EN COMPTE DU RISQUE TASSEMENT DANS LA GESTION

Les praticiens ont, depuis une vingtaine d'années, pris conscience du risque que faisait courir à la durabilité des fonctions des écosystèmes, une mécanisation mal contrôlée des opérations sylvo-coles. La dégradation des sols est rapide, mais leur restauration naturelle est très lente, et la remédiation est difficile, coûteuse et incertaine.

Le guide PROSOL identifie les problèmes et conduit à la recommandation forte de la mise en place de cloisonnements d'exploitation où les engins circuleraient sans parcourir la parcelle productive (Pischedda *et al.*, 2009). Leur mise en place est actuellement effective en forêt publique, probablement dans les grandes propriétés privées, mais peu voire pas en petite propriété privée.

Ces cloisonnements espacés d'une vingtaine de mètres et d'une largeur d'environ 4 à 5 m excluent d'emblée de 20 à 25 % de surface productive. Il convient donc impérativement d'éviter leur dégradation, pour y maintenir la circulation des matériels, mais également pour la continuité écologique des parcelles, puisque ces cloisonnements sont à l'instar des chemins, et comme leur nom l'indique, des cloisons.

Le maintien en l'état des cloisonnements pose un problème sérieux aux exploitants forestiers. Un guide spécifique vient d'être élaboré à cet égard (Pischedda et Hélou, 2017). Il recommande de stopper la circulation quand les toutes premières ornières de plus de 20 cm apparaissent sur les cloisonnements d'exploitation et de 30 cm sur les cloisonnements principaux. Pour la forêt publique, le Cahier national des prescriptions d'exploitation forestière (CNPEF) (ONF, 2020) stipule le devoir d'interruption des chantiers sous les conditions d'orniérage décrites dans le guide *Pratic'sols*. Le contournement des cloisonnements conduirait rapidement à une diminution très significative de la zone de production, et se traduirait sur toutes les fonctions environnementales des sols, en particulier par la modification du réseau hydrographique superficiel.

PERSPECTIVES

Elles doivent être envisagées en prenant en compte tous les aspects relatifs à la spécificité de forêt française et de la filière bois dans son ensemble :

- besoins croissants d'une population avide de bio-matériaux et d'énergies renouvelables,
- sous-utilisation des feuillus qui représentent pourtant 70 % de la surface de la forêt française, mais uniquement 25 % du bois d'œuvre récolté,

- coût élevé des infrastructures dans le bilan économique : voies d'accès aux parcelles, aires de stockage de bois...
- augmentation rapide de la prise en compte des données environnementales (sols, biodiversité, eau, air, paysages...) sans que la société ne soit prête à rémunérer quelque service que ce soit ; seul le problème de la ressource en eau de qualité produite en général par la forêt semble progresser,
 - changements climatiques en cours modifiant rapidement l'environnement des peuplements,
 - mécanisation incontournable des opérations sylvicoles à cause de la pénibilité des travaux manuels,
 - modèle technique privilégiant certaines catégories de produits,
 - modèle économique prônant une gestion à flux tendus,
 - déficit d'innovation dans l'utilisation de molécules élaborées telles la lignine, dont une partie importante est utilisée le plus banalement que l'on puisse imaginer, la combustion,
 - survie des entreprises, à commencer par les ETF,
 - déficit abyssal de la filière (6 à 7 milliards d'euros en 2019), qui n'intègre toujours pas la dégradation éventuelle du patrimoine.

La forêt française est à un tournant et les principes de son aménagement et de sa gestion doivent évoluer ; les changements climatiques imposent une accélération du processus :

- Le choix des essences doit être nettement revu en évitant tout aménagement simpliste, car toute essence en limite d'aire est particulièrement sensible aux stress, et ceci d'autant plus que le sol est peu fertile. Les structures des peuplements doivent s'adapter pour améliorer leur résilience : le modèle monoculture équienne récolté en une seule fois puis planté, avec un travail en plein sur les parcelles (andainage, broyage, travail du sol), transposé de l'agriculture intensive dans les années 1960, doit être repensé quand la forêt est traitée sans intrants. Une ligniculture intensive avec intrants n'est pas exclue, toutefois les cultures ligno-cellulosiques sur sol pouvant supporter des cultures alimentaires n'ont pas d'avenir.
- La fertilité des sols doit être respectée dans toutes ses composantes, maintenue, voire améliorée, car toutes leurs fonctions en dépendent. Dans les sols les plus pauvres (le seuil de pH 4,5 semble déterminant), la restauration de la fertilité est un gage de durabilité : limite et restitution des exportations, amendements appropriés, dégâts physiques évités ou traités. Le recyclage des déchets intéressants pour le sol, les plantes et l'environnement, devrait localement participer à la gestion environnementale du territoire (résidus de stations d'épuration ou cendres de chaufferies collectives). L'exportation de rémanents, de menus bois voire des souches sont très dommageables pour le sol : peu de sols forestiers peuvent la soutenir (Cacot *et al.*, 2006).
- La mécanisation avec des engins de plus en plus lourds, circulant sur les parcelles ou même uniquement sur les cloisonnements, doit être repensée. Les abatteuses dont la capacité de la flèche est incompatible avec le bras de levier engendré, s'approchent toujours au pied des arbres de grande taille. L'utilisation des pneus larges pour les débardeurs améliorant la portance augmente fortement le risque de charges transportées plus fortes, et les conséquences sur les sols également (Delage, 2020). L'innovation doit allier mécanisation et respect absolu des sols : les méthodes alternatives, limitant considérablement l'impact des coupes et des récoltes, doivent se développer. Ces méthodes peuvent être viables économiquement, moyennant un apprentissage des exploitants, une internalisation des coûts des dégâts collatéraux résultant de travaux mal gérés (remise en état des sols et des infrastructures), des contrats d'approvisionnement garantissant un revenu, et des aides mieux ciblées. Le développement des récoltes par câble, y compris dans certains cas pour les éclaircies, et pas seulement sur les sols en pentes, est une voie très intéressante. Il autoriserait l'extraction de grumes y compris dans un patchwork de petites propriétés, pratiquement pour tous les états hydriques de tous les types de sols avec peu de dégâts majeurs (figure 12, p. 209), limitant et respectant les infrastructures coûteuses.

FIGURE 12 VUE AÉRIENNE DU SITE DE CLERMONT-EN-ARGONNE (MEUSE) DATÉE DE L'ÉTÉ 2008
(49°08'43"N 5°00'13"E) (source : © Google Earth)

Les cinq lignes verticales correspondent aux dégâts au sol causés par le débardage par câble : une estimation rapide montre qu'ils représentent moins de 5 % de la surface totale débardée.



CONCLUSIONS

Les écosystèmes forestiers ont évolué lentement, depuis parfois des milliers d'années, pour aboutir à leur état actuel. Ces écosystèmes assurent de multiples fonctions, ils sont efficaces et résilients, mais sensibles à une gestion inappropriée. Lors des déboisements anciens, affectant près de la moitié de la surface forestière actuelle, les sols ont *de facto* été transformés, avec toutefois des pratiques manuelles relativement douces par rapport aux méthodes actuelles.

Le tassement représente une contrainte additionnelle très forte pour les sols, dont les effets commencent seulement à être mesurés. Les résultats indicateur-dépendant, ne simplifient pas l'appréhension objective, et donc le diagnostic de sensibilité d'un sol au tassement, et de sa dynamique de restauration. De plus, compte tenu des variables mises en jeu, il faudrait beaucoup plus de sites d'observation pour prévoir le comportement des sols français !

L'expérience montre que les dégradations peuvent être rapides, mais que les restaurations sont lentes : le tassement des sols en est un bon exemple, mais les exportations minérales en sol pauvre conduisent aux mêmes conclusions (Landmann et Nivet, 2014). La question du cumul des deux contraintes est directement posée par les sites lorrains.

La durabilité des écosystèmes forestiers exige de réfléchir à la gestion actuelle trop souvent simpliste pour des écosystèmes à fort degré de naturalité, mais par nature vulnérables. Le sol est une ressource clé, non renouvelable à l'échelle humaine, qu'il convient de respecter. Lorsque la gestion d'une forêt est plutôt extensive, plus la récolte concerne des bois âgés et moins elle concernera les petits compartiments de biomasse, plus la structure du sol sera respectée, et plus la durabilité du système sera assurée. Seuls les processus inévitables d'acidification devront être traités de manière appropriée, de façon à ce que le sol remplisse les fonctions attendues. Si le système s'intensifie, alors l'ensemble des paramètres devra être pris en compte, dont le maintien de la fertilité des sols, nécessitant inévitablement des intrants appropriés.

La multifonctionnalité active à l'échelle d'un territoire n'exclut ni la récolte de bois, ni le développement opportuniste de systèmes localement plus intensifs. Il s'agit d'un enjeu majeur qui doit respecter dans un territoire la structure de la propriété (multiple en général), mais également le multiusage dépassant généralement le cadre précédent, afin d'atteindre les objectifs de la durabilité des écosystèmes et de l'environnement. Depuis les années 1990, la gestion multifonctionnelle des forêts est mise en avant (Barthod, 1997, 2012). Le contexte socio-économico-environnemental a cependant beaucoup évolué, et la multifonctionnalité de fait, somme toute passive, devient insuffisante : les hommes, l'économie et l'environnement ont changé et il est urgent d'intégrer ce constat dans une dynamique volontariste et active. Les fonctions majeures des sols et des écosystèmes, autres que la stricte production (quantité et qualité des eaux de surface, atmosphère *via* les émissions de GES, biodiversité, paysages) ne peuvent être considérées qu'à l'échelle territoriale.

Jacques RANGER – Arnaud LEGOUT – Pascal BONNAUD –
Gilles NOURRISSON – Dominique GELHAYE
INRAE Centre de Nancy Grand Est
UR Biogéochimie des écosystèmes forestiers
F-54280 CHAMPENOUX
(jacques.ranger@inrae.fr, arnaud.legout@inrae.fr,
pascal.bonnaud@inrae.fr, gilles.nourrisson@inrae.fr,
dominique.gelhay@inrae.fr)

Dominique ARROUAYS
INRAE Centre Val de Loire
Unité Infosol
2163 avenue de la Pomme de Pin
CS 40001
ARDON
F-45075 ORLÉANS CEDEX 2
(dominique.arrouays@inrae.fr)

Noémie POUSSE
OFFICE NATIONAL DES FORÊTS
Département R&D
1175 Chemin du Lavarin
F-84000 AVIGNON
(noemie.pousse@onf.fr)

Remerciements

Les auteurs tiennent à remercier :

- toutes les personnes ayant contribué à la mise en place des sites-ateliers d'Azerailles et de Clermont-en-Argonne, le Département RDI et la Direction territoriale Grand-Est de l'ONF, et l'INRAE en particulier ;
- les bailleurs de fonds - INRAE, ONF, MEDD, ADD, MAP, DRAF Lorraine Serfob, Ademe, Feder, GIP Ecofor, CNRS, Société LHOIST. Ces sites sont labellisés SOERE et Annaee ;
- tous les collègues de l'INRAE d'Avignon, de Laon, d'Orléans et de Rennes, des universités de Lorraine et de Paris 6, ainsi que les nombreux étudiants stagiaires, qui ont participé aux travaux de recherche menés sur le site depuis plus de 10 ans ;
- le groupement d'intérêt scientifique (GIS) Sol et tous les partenaires ayant œuvré dans le cadre du réseau de mesures de la qualité des sols (RMQS) de France.

BIBLIOGRAPHIE

- ACHAT D.L., DELEUZE C., LANDMANN G., POUSSE N., RANGER J., AUGUSTO L., 2015. Quantifying environmental consequences of residue harvesting in forest ecosystems – a meta-analysis. *Forest Ecology and Management*, 348, pp. 124-141.
- ARROUAYS D., RANGER J., 2014. La Qualité des sols forestiers face aux changements globaux. *Revue forestière française*, LXVI (4, spécial "Ateliers REGEFOR 2013. La gestion de la fertilité des sols forestiers est-elle à un tournant ?"), pp. 407-412.
- BADEAU V., DAMBRINE E., WALTER C., 1999. Propriétés des sols forestiers français : Résultats du premier inventaire systématique. *Etud. Gest. Sols*, 6 (3), pp. 165-179.
- BARTHOD C., 1997. *Les critères et les indicateurs de gestion durable des forêts tempérées, un bref bilan de l'expérience des années 1992-1996*. Mémoire volontaire présenté au XI^e Congrès forestier mondial, 13-22 octobre 1997, Antalya (Turquie).
- BARTHOD C., 2012. Aux origines des indicateurs de gestion durable des forêts. *Revue forestière française*, LXIV (5 spécial "Les indicateurs forestiers sur la voie d'une gestion durable"), pp. 551-560.
- BEDEL L., POSZWA A., VAN DER HEIJDEN G., LEGOUT A., AQUILINA L., RANGER J., 2016a. Unexpected calcium sources in deep soil layers in low-fertility forest soils identified by strontium isotopes (Lorraine plateau, eastern France). *Geoderma*, 264, pp. 103-116.
- BEDEL L., LEGOUT A., POSZWA A., VAN DEN HEIJDEN G., COURT M., GOUTAL-POUSSE N., MONTARGES-PELLETIER E., BONNAUD P., RANGER J., 2016b. Soil aggregation is a relevant indicator of soil mineral fertility: the case study of soils in the plateau lorrain. *AFS*, 4, pp. 75-103.
- BERTHELOT A., RANGER J., GELHAYE D., 2000. Nutrient uptake and immobilization in a short-rotation coppice stand of hybrid poplars in north-west France. *Forest Ecology and Management*, 128 (3), pp. 167-179.
- BONNAUD P., SANTENOISE Ph., TISSERAND D., NOURRISSON G., RANGER J., 2019. Impact of compaction on two sensitive forest soils in Lorraine (France) assessed by the changes occurring in the perched water table. *Forest Ecology and Management*, 437, pp. 380-395.
- BONNEAU M., NYS C., 1993. A nitrogen cycle model for calculating the reduction of N-input necessary to reduce soil acidification and nitrate leaching and the consequences of this for wood production. *Water Air Soil Pollution*, 69, pp. 1-20.
- CACOT E., EISNER N., CHARNET F., LÉON P., RANGER J., 2006. *La Récolte raisonnée des rémanents en forêt*. Angers : ADEME [Agence de l'environnement et de la maîtrise de l'énergie]. 36 p.
- CAPOWIEZ Y., BOIZARD H., BOTTINELLI N., RANGER J., 2015. *Capacity of earthworms to restructure compacted soils*. Colloque Regeneration of compacted forest soils, Osnabrück, (Germany), 29 octobre 2015.
- CHANGEY F., NUNAN N., ASSAQUI G., GIGON A., PANDO A., LELOUP J., RANGER J., ZELLER B., EPON D., LERCH T., 2019. *Impact du tassement des sols forestiers sur les communautés microbiennes : conséquences sur les flux de CO₂ et de CH₄*. Colloque AFEM Vosges.
- CHRISTINA C., NOUVELLON Y., LACLAU J.P., STAPE J.L., BOUILLET J.P., LAMBAIS G.R., LE MAIRE G., 2016. Importance of deep water uptake in tropical eucalypt. *Forest Functional Ecology*, 31, pp. 509-519.
- DELAGE P., 2020. *Le Tassement des sols : aspects mécaniques*. Présentation orale à la séance plénière de l'Académie d'agriculture de France, Paris, 7 octobre 2020.
- DROUET T., HERBAUTS J., DEMAÏFFE D., 2015. Influence of deep soil horizons on Ca nutrition of forest stands along a loessic soil sequence. *Plant and Soil*, 394 (1/2), pp. 373-389. DOI: 10.1007/s11104-015-2540-3.

- DUCHAUFOUR Ph., 1977. *Pédologie. Tome 1 Pédogénèse et classifications des sols*. Paris : Masson Ed. 477 p.
- EPRON D., PLAIN C., NDIAYE F.-K., BONNAUD P., PASQUIER C., RANGER J., 2016. Effects of compaction by heavy traffic on soil fluxes of methane and carbon dioxide in a temperate broadleaved forest. *Forest Ecology and Management*, 382, pp. 1-9.
- FATRÉ B., 2012. *Suivi de plantations de Chêne sessile après dégradation de sols sensibles suite au passage d'un engin de débardage et effets de restaurations mécanique et chimique : observations réalisées sur deux sites expérimentaux en Lorraine*. Mémoire de BTS de Gestion forestière. Mirecourt.
- GOUTAL-POUSSE N., BOCK J., RANGER J., 2014. Impacts de la circulation d'un engin forestier sur deux sols sensibles au tassement et dynamique de restauration naturelle. *Rendez-vous Techniques*, (43), pp. 33-39.
- GOUTAL N., RENAULT P., RANGER J., 2013a. Forwarder traffic impacted over at least four years soil air composition of two forest-soils northeastern France. *Geoderma*, 193-194, pp. 29-40.
- GOUTAL N., KELLER T., DEFOSSEZ P., RANGER J., 2013b. Soil compaction due to heavy forest traffic: measurements and simulations using an analytical soil compaction model. *Ann. For. Sci.*, 70, pp. 545-556.
- GOUTAL N., PARENT F., BONNAUD P., DEMAISON J., NOURRISSON G., EPRON D., RANGER J., 2012. Soil CO₂ concentration and efflux as affected by forest heavy traffic in northeast France. *European Journal of Soil Science*, Doi: 10.1111/j.1365-2389.2011.01423.x
- HOBBIE S.E., REICH P.B., OLEKSYN J., OGDahl M., ZYKOWIAK R., HALE C., KAROLEWSKI P., 2006. Tree species effects on decomposition and forest floor dynamics in a common garden. *Ecology*, 87(9), pp. 2288-2297.
- JULIEN J.L., DAMBRINE E., 2011. L'Acidification des sols (chapitre 24). In : Girard M.C., Walter R., Berthelin J.C., Morel, J.L. C.E.D. (Ed.). *Pédologie et environnement*. 2nd édition. Paris : Dunod. 881 p.
- KOERNER W., DUPOUEY J.L., DAMBRINE E., BENOIT M., 1997. Influence of past land use on the vegetation and soils of present day forest in the Vosges mountains, France. *J. Écol.*, 85, pp. 351-358.
- KRAMER P.J., KOSLOWSKI T.T., 1979. *Physiology of woody plants*. London: Academic Press. 811 p.
- LACLAU J.P., DELEPORTE P., RANGER J., BOUILLET J.P., KAZOTTI G., 2003. Nutrient dynamics throughout the rotation of *Eucalyptus* clonal stands in Congo. *Ann. Bot.*, 91 (7), pp. 879-892.
- LACLAU J.P., RANGER J., DE MOARES GONÇALVES J.L., MAQUÈRE V., KRUSHE A.V., THONGO BOU A., NOUVELLON Y., SAINT-ANDRÉ L., BOUILLET J.P., PICCOLO M.C., DELEPORTE P., 2010. Biogeochemical cycles of nutrients in tropical *Eucalyptus* plantations. Main features shown by 10 years of monitoring in Congo and Brazil. *Forest Ecology and Management*, 259, pp. 1771-1785.
- LANDMANN G., NIVET C. (coord.), 2014. *Projet RÉSOBIO, Gestion des rémanents forestiers : préservation des sols et de la biodiversité*. Angers : ADEME ; Paris : Ministère de l'Agriculture, de l'Agroalimentaire et de la Forêt – GIP Ecofor. Rapport final. 243 p.
- LEGOUT A., HANSSON K., VAN DER HEIJDEN G., LACLAU J.P., AUGUSTO L., RANGER J., 2014. Fertilité chimique des sols forestiers : concepts de base. *Revue forestière française*, LXVI (4, spécial "Ateliers REGEFOR 2013. La gestion de la fertilité des sols forestiers est-elle à un tournant ?"), pp. 413-424.
- LE TACON F., 2017. *Les truffes : biologie, écologie et domestication*. Nancy : AgroParisTech. 303 p.
- ONF, 2020. *Cahier national des prescriptions d'exploitation forestière (CNPEF)*, version 2020. 60 p.
- PISCHEDDA D. (coordinateur), 2009. *Pour une exploitation forestière respectueuse des sols et de la forêt. PROSOL. Guide technique*. Office national des Forêts. 110 p.
- PISCHEDDA D., HÉLOU T. E. (coordinateurs), 2017. *Pratic'sols - Guide sur la praticabilité des parcelles forestières*. Office national des forêts et Fédération nationale des entrepreneurs des territoires. 48 p.
- PLAIN C., NDIAYE F.-K., BONNAUD P., RANGER J., EPRON D., 2019. Impact of vegetation on the methane budget of a temperate forest. *New Phytologist*, 22, pp. 1447-1456.
- POUSSE N., BONNAUD P., LEGOUT A., DARBOUX F., RANGER J., 2021. Medium-term soil natural recovery after forest trafficking: assessment by soil penetration resistance. Soumis *FEM*.
- RANGER J., 1981. Étude de la minéralomasse et du cycle biologique dans deux peuplements de Pin laricio de Corse, dont l'un a été fertilisé à la plantation. *Ann. Sci. for.*, 38 (1), pp. 127-158.
- RANGER J., 2017. Les sols forestiers. Caractéristiques et durabilité. Chapitre 7. In : Berthelin J., Valentin C., Munch J.C. (sous la direction de). *Les sols au cœur de la zone critique. Volume 1 : Fonctions et services*. Éditions ISTE. 348 p. (Géosciences ; Les sols).
- RANGER J., BONNEAU M., 1984. Effets prévisibles de l'intensification de la production et des récoltes sur la fertilité des sols de forêt. I. Le cycle biologique en forêt. *Revue forestière française*, XXXVI (2), pp. 93-112.
- RANGER J., MARQUES R., COLIN-BELGRAND M., 1997. Nutrient dynamics during the development of a Douglas-fir (*Pseudotsuga menziesii* Mirb.) stand. *Acta oecol.*, 18 (2), pp. 73-90.

- RANGER J., ANDREUX F., DAMBRINE E., 2005. Les sols forestiers (ch. 4). In : Berthelin, J., Girard M.C., Walter C. (Ed.). *Pédologie et environnement*. Paris : Dunod : 816 p.
- RANGER J., MARQUES R., COLIN-BELGRAND M., FLAMMANG N., GELHAYE D., 1995. The dynamics of biomass and nutrient accumulation in a Douglas-fir (*Pseudotsuga menziesii* Franco) stand studied using a chronosequence approach. *Forest Ecology and Management*, 72 (2-3), pp. 167-183.
- RANGER J., AUGUSTO L., BERTHELOT A., BOUCHON J., CACOT E., DAMBRINE E., GAVALAND A., LACLAU J.P., LEGOUT A., NICOLAS M., NYS C., PONETTE Q., OTTORINI J.M., SAINT ANDRÉ L., 2010. Sylviculture et protection des sols. *Revue forestière française*, LXIII (2), pp. 245-264.
- RANGER J., GOUTAL-POUSSE N., BONNAUD P., BEDEL L., DAVESNE R., DEMAISON J., NOURRISSON G., 2015. *Effet de la mécanisation des travaux sylvicoles sur la qualité des sols forestiers : dynamique de la restauration naturelle ou assistée de leurs propriétés physiques*. 78 p.
- RANGER J., BONNAUD P., SANTENOISE Ph., NOURRISSON G., PELLETIER M., GELHAYE D., LEGOUT A., 2021. Assessment of forest soil changes and recovery after a limited compaction, using soil solution chemistry collected by porous cup lysimeters as an indicator: two case studies of acidic environments in the plateau lorrain (France). *Soumis FEM*.
- RAPOSO ALMEIDA J.C., LACLAU J.P., DE MORAES GONÇALVES L., RANGER J., SAINT-ANDRÉ L., 2010. A positive response to NaCl application in *Eucalyptus grandis* (W. Hill ex Maiden) plantations established on K-deficient soils. *Forest Ecology and Management*, 259, pp. 1786-1795.
- ROTARU C., 1983. Tassement du sol forestier et récolte mécanisé du bois. *Courrier de l'Exploitant et du Scieur*, Études 1/83, 12 p.

INTERACTIONS ENTRE LES EFFETS DU TASSEMENT PAR LES ENGINS D'EXPLOITATION ET LA FERTILITÉ CHIMIQUE DES SOLS FORESTIERS [Résumé]

Les sols forestiers sont le plus généralement pauvres et la moitié d'entre eux a une valeur de pH_{eau} inférieure à 5. L'écosystème s'est lentement adapté à cet état de fait *via* le processus complexe des cycles biogéochimiques, où le recyclage massif des éléments utiles conduit à une frugalité apparente des peuplements forestiers et à un ensemble de fonctions très satisfaisantes, dont la production. Toute réduction de fertilité dans ses composantes physique, chimique et biologique, totalement interactives, se traduit par une dégradation de ces fonctions. La contrainte physique liée à la mécanisation des opérations sylvicoles présente un risque majeur quant à la durabilité des sols. Les effets du tassement sont analysés dans cet article à partir des résultats obtenus dans deux sites expérimentaux installés sur les sols sensibles du plateau Lorrain, suivis pendant une douzaine d'années. Les résultats montrent que si la dégradation des sols est rapide, leur restauration est lente. Des travaux sur le long terme sont indispensables. Quoi qu'il en soit, la protection des sols, en particulier de leur structure physique, représente un enjeu majeur.

INTERACTION BETWEEN THE EFFECTS OF COMPACTION BY FORESTRY EQUIPMENT AND THE CHEMICAL FERTILITY OF FOREST SOILS [Abstract]

French forest soils are generally poor and half of them have a water-pH lower than 5. The slow adaptation of all the ecosystem components is known as the biogeochemical cycle of nutrients. It consists in a massive recycling of elements useful for trees, often seen as indicative of frugality of forests, that leads to satisfactory functions, including production. Conversely, any decrease in forest soil fertility adversely affects all these functions. The physical stress deriving from mechanization of forest operations represents a new major risk for soil conservation, in strong interaction with mineral fertility. The effects of compaction are analysed in this presentation based on results obtained at two experimental sites established twelve years ago on the sensitive soils of the *plateau Lorrain*. Conclusions show that whereas soil degradation is rapid, its restoration is slow. Longer-term studies are necessary, but it is clear that soil protection is a major issue, particularly as regards its physical properties.



Licence Creative Commons

Attribution + Pas de Modification + Pas d'Utilisation Commerciale (BY ND NC)