

Le suivi de la restauration du fonctionnement de deux sols forestiers après tassement dans le Nord Est de la France

N. Goutal⁽¹⁾, N. Bottinelli⁽²⁾, D. Gelhaye⁽²⁾, P. Bonnaud⁽²⁾, G. Nourrisson⁽²⁾, J. Demaison⁽²⁾,
A. Brêthes⁽³⁾, Y. Capowiez⁽⁴⁾, F. Lamy⁽⁵⁾, A. Johannes⁽⁵⁾, P. Boivin⁽⁵⁾, et J. Ranger⁽²⁾*

- 1) ONF département Recherche et Développement pôle de Nancy - 11 rue de l'Île de Corse - 54000 Nancy
- 2) INRAUR1138 BEF Biogéochimie des Ecosystèmes Forestiers - F-54280 Champenoux - France.
- 3) ONF département Recherche et Développement pôle de Boigny - 100 boulevard de la Salle - BP 20- 45760 Boigny-sur-Bionne
- 4) INRA UR 1115 PSH Plantes et Systèmes Horticoles - F-84914 Avignon Cedex 9, France
- 5) Univ. of Applied Sciences of western Switzerland Hepia - route de Presinge 150 - 1254 Jussy - Suisse

* : Auteur correspondant : ranger@nancy.inra.fr

RÉSUMÉ

La déformation d'un sol soumis à la circulation d'engins a été identifiée comme un risque majeur menaçant la qualité des sols, et qui n'épargne pas les écosystèmes forestiers. Le dysfonctionnement à long terme de sols forestiers tassés reste encore peu étudié et l'on manque d'études intégrées sur le long terme pour appuyer les décisions de gestion forestière. Deux sites expérimentaux de suivi à court et long terme de l'impact de la circulation d'un porteur chargé de bois sur des sols forestiers sensibles et acides (forte teneur en limon, engorgement temporaire dû à une rupture texturale vers 50 cm de profondeur) ont été mis en place en Lorraine (NE France). Ces sites font l'objet d'un suivi multicritère intensif comprenant des indicateurs physiques (macroporosité, densité apparente, résistance à la pénétration et pédoclimat), chimiques (composition de l'atmosphère et des eaux libres et faiblement liées du sol) et biologiques (flore, croissance de plants de chênes sessiles, communautés lombriciennes). Le suivi du pédoclimat et de la composition de l'atmosphère du sol a montré une forte dégradation de l'aération du sol (augmentation de la fréquence et de l'intensité de l'engorgement et couche imperméable en surface) qui a duré pendant les 12 à 18 mois qui ont suivi le passage du porteur forestier. Ce fort effet initial sur l'aération du sol diminue dès l'apparition de la première sécheresse édaphique grâce à la fissuration du sol tassé en surface, mise en évidence à partir de lames minces et du suivi de la densité apparente. Cependant, 3 à 4 ans après le passage de l'engin, le régime hydrique ainsi que la composition de l'atmosphère et des eaux du sol sont toujours significativement altérés par le tassement. Les suivis respectifs de la résistance à la pénétration du sol, de la végétation herbacée et des peuplements de chêne sessile n'indiquent pas de retour de ces paramètres à des valeurs non perturbées. Ainsi le sol reste très perturbé par le tassement sur le moyen terme même si on observe un début de restauration dû à des processus physiques (humectation/dessiccation, gel/dégel) en surface (0-10 cm).

Mots clés

Sol, tassement, restauration, forêt, interactions, suivi multicritère.

SUMMARY

SOIL FUNCTIONING RECOVERY FOLLOWING HEAVY TRAFFIC IN TWO FOREST SITES IN NORTHEAST FRANCE

Soil compaction belongs to the major threats to soil quality with no exceptions of forest ecosystems. Long term impact of heavy traffic on forest soil functioning has received little attention and integrated long term studies are missing to support forest management decisions. Two experimental sites were set up in the north east of France to monitor short- to long-term impacts of the same wood-loaded forwarder on acidic and compaction sensitive soil with similar morphologies (50 cm thick silt loam layer laying on a clayey layer). We investigated continuously soil climate (temperature and moisture), monthly soil air and water compositions and yearly soil bulk density, macroporosity, resistance to penetration and fauna. Soil climate and air composition monitoring showed a strong initial decrease in aerobic conditions (increase in water logging frequency and intensity, creation of a layer impervious to gas at the soil surface) lasting one to one and a half year after forwarder traffic. The strong initial impact on soil aeration decreased concurrently with the first soil drought experienced at both sites, thanks to soil cracks formation in the disturbed soil surface as evidenced by soil image analysis and monitoring of soil bulk density. Yet heavy traffic still affected significantly soil water content and composition and soil air composition three to four years after compaction at both sites. The monitoring of soil resistance to penetration, ground vegetation cover and sessile oak plantation did not indicate any beginning of recovery to undisturbed levels. At both sites, soil functioning remained disturbed by heavy traffic on the medium term even if we observed a beginning of soil structure regeneration thanks to physical processes (shrink/swell, freezing/thawing) at the soil surface (0-10 cm).

Key-words

Soil, compaction, recovery, forest, interaction, multi-criterion monitoring.

RESUMEN

EL SEGUIMIENTO DE LA RESTAURACIÓN DEL FUNCIONAMIENTO DE DOS SUELOS FORESTALES DESPUÉS DE COMPACTACIÓN EN EL NORESTE DE FRANCIA

Se identificó la deformación de un suelo sometido a la circulación de maquinarias como un riesgo mayor que amenaza la calidad de los suelos, y que no ahorra los ecosistemas ecológicos. La disfunción a largo plazo de los suelos forestales compactados queda todavía poco estudiada y faltan estudios integrados a largo plazo para apoyar decisiones de gestión forestal. Se instalaron dos sitios experimentales de seguimiento a corto y largo plazo del impacto de la circulación de un portador cargado de madera sobre suelos forestales sensibles y ácidos (fuerte contenido en limo, anegamiento temporal debido a una ruptura textural a 50 cm de profundidad) en Lorena (NE de Francia). Estos sitios hacen el objeto de un seguimiento multicriterio intensivo que incluye indicadores físicos (macroporosidad, densidad aparente, resistencia a la penetración y pedoclima), químicos (composición de la atmósfera y de las aguas libres y ligeramente ligadas al suelo) y biológicos (flora, crecimiento de plantas de robles albares, comunidades de lombrices). El seguimiento del pedoclima y de la composición de la atmósfera del suelo muestra una fuerte degradación de la aeración del suelo (aumento de la frecuencia y de la intensidad del anegamiento y capa impermeable en superficie) que duro durante los 12 a 18 meses que siguieron el paso del portador forestal. Este fuerte efecto inicial sobre la aeración del suelo disminuye con la aparición de la primera sequía edáfica gracias a la fisuración del suelo compactado en superficie, destacada con laminas delgadas y seguimiento de la densidad aparente. Sin embargo, 3 o 4 años después del paso de la máquina, el régimen hídrico así que la composición de la atmósfera y de las aguas del suelo están todavía significativamente alterados por la compactación. Los seguimientos respectivos de la resistencia a la penetración, de la vegetación herbácea y de las poblaciones de roble albar no indican un retorno de estos parámetros a valores no perturbados. Así, el suelo queda muy perturbado por la compactación a medio plazo aunque se observa un principio de restauración debido a procesos físicos (humectación / desecación, hielo / deshielo) en superficie (0 – 10 cm).

Palabras clave

Suelo, compactación, restauración, selva, interacciones, seguimiento multicriterio

Le risque de tassement n'épargne pas les sols forestiers étant donné l'intérêt accru pour le bois en tant qu'éco-matériau et la mécanisation croissante des opérations forestières (Curran et Howes, 2011). Les sols forestiers français sont en majorité plus acides et plus organiques que les sols agricoles (Badeau *et al.*, 1999), ils ont également une portance plus faible que les sols agricoles et prairiaux (Blanco-Canqui *et al.*, 2005). Ainsi, les contraintes verticales mesurées lors d'opérations forestières pouvant aller jusqu'à 550 kPa, valeurs toujours supérieures à la portance de la grande majorité des sols forestiers humides, le risque de dégradation physique des sols forestiers est élevé (Horn *et al.*, 2007). De plus, la restauration des dégradations (décompactage, drainage, génie écologique) étant difficile, coûteuse et rarement durable, et la valeur économique de la ressource bois limitée, la recommandation pour la forêt française est de développer la prévention, en évitant ou limitant les déformations non réversibles faute de moyens efficaces de restauration. Certes, la fréquence d'intervention en forêt n'est pas aussi élevée qu'en agriculture, il n'en demeure pas moins que les durées nécessaires à la restauration des propriétés physiques de sols forestiers compilées dans la littérature (Miller *et al.*, 2004) sont supérieures aux laps de temps généralement observés entre deux passages d'engins en forêt. Des difficultés de circulation et d'organisation des chantiers d'exploitation pourraient ainsi devenir de plus en plus fréquentes sur des sols tassés dont la porosité ne s'est pas restaurée (sol moins drainant et/ou dont les ornières sont profondes). Si de nombreuses études ont permis d'améliorer significativement les connaissances sur la problématique de dégradation des sols agricoles par tassement, le comportement des sols forestiers en déformation et en restauration est moins bien connu (Roger-Estrade *et al.*, 2011). La spécificité des sols forestiers (*e.g.* forte acidité conduisant à la présence dominante d'aluminium sur le complexe d'échange, ou au contraire forte alcalinité, avec présence en général d'une couche de litière, teneur élevée en matière organique dans l'horizon organo-minéral, présence de racines pérennes et d'éléments grossiers, contexte où l'hydromorphie est plus fréquente qu'en sol agricole, travail du sol peu fréquent ou limité en tête de révolution, amendements et fertilisation tout aussi peu fréquents) ne permet pas d'extrapoler directement les modèles de prévision de la teneur en eau des sols, de la déformation sous les roues d'un engin ou de la productivité végétale tels que calibrés en milieu agricole (Roger-Estrade *et al.*, 2011). La dynamique de restauration naturelle de sols forestiers tassés et l'importance relative des facteurs l'influençant sont également probablement spécifiques et sont encore peu connus. Si les facteurs de sensibilité de dégradation des propriétés physiques d'un sol forestier donné sont relativement bien connus qualitativement et ont permis de donner des consignes préventives de protection des sols, pour être complets, ces diagnostics de sensibilité devraient inclure les facteurs influençant la vitesse de restauration. Les connaissances sur les dynamiques de restauration de sols forestiers tas-

sés permettraient également de mettre au point des techniques de remédiation (physique et/ou chimique) des dégradations. Dis-cage, sous-solage, et travail localisé au profit des plants n'ont été que peu testés en forêt. De plus, si l'amendement calco-magnésien a déjà fait ses preuves pour améliorer l'équilibre nutritionnel à moyen terme de peuplements poussant sur des sols pauvres, son intérêt pour accélérer la vitesse de régénération de sols acides et compactés reste encore à évaluer (Ampoorter *et al.*, 2011).

Les objectifs de ce travail ont été de suivre à court et moyen termes (0-4 ans) l'impact de la circulation d'un porteur sur des sols sensibles au tassement et de comprendre leur dynamique de restauration, en testant sur le sol le plus acide l'effet d'un amendement calco-magnésien. Le suivi s'appuyant sur différentes propriétés physiques, chimiques et biologiques, à différentes échelles spatiales et temporelles, avait également pour objectif d'évaluer la pertinence d'un ou plusieurs indicateurs de dégradation, qui soient à la fois sensibles à la déformation du sol sous le poids d'un engin et pertinents pour caractériser la régénération des fonctions du sol impactées par le tassement.

DISPOSITIFS EXPÉRIMENTAUX ET INSTRUMENTATION

Description des sites

Un projet de recherche (« dégradation physique des sols agricoles et forestiers liée au tassement », DST) (Roger-Estrade *et al.*, 2011) cofinancé par l'Agence Nationale pour la Recherche (ANR) et le Ministère de l'Ecologie, de l'Energie, du Développement Durable et de l'Aménagement du Territoire (MEEDDAT) a permis l'installation, avec le soutien financier de l'Office National des Forêts (ONF), de deux dispositifs de suivi à court et long termes de la dégradation physique de sols forestiers suite au passage d'un débardeur (Ranger *et al.*, 2010). Les deux sites sont situés en forêt des « Hauts Bois », commune d'Azerailles, Meurthe-et-Moselle (54), et en forêt de « Grand Pays », commune de Clermont-en-Argonne, Meuse (55). Les sites et la mise en place des essais de tassement contrôlé ne seront que brièvement décrits ici : pour plus de détails se référer aux documents Goutal *et al.* (2012a, 2012b, 2013a, 2013b) et Ranger *et al.* (2010). Les sites d'Azerailles (AZ) et de Clermont-en-Argonne (CA) ont été choisis car leurs sols présentent des caractéristiques de désignation morpho-édaphique similaires, les identifiant comme sensibles au tassement. Cette sensibilité à des contraintes mécaniques provient à la fois de leur texture très limoneuse (plus de 50 % de limons entre la surface et 50 cm de profondeur), et de la présence d'un engorgement temporaire limité à la base de la couche limoneuse dû à la présence d'un substrat beaucoup plus argileux et imperméable à partir de 50 cm de profondeur environ (issu de l'altération d'une marne du Keuper à AZ et de

l'altération d'une gaize du Cénomaniens à CA). Cependant, les deux sols diffèrent légèrement, notamment en terme de pH (e.g. de 0 à 10 cm de profondeur, le pH eau est de 4.4 à CA et 4.8 à AZ), de teneur en argile (10 % de plus à AZ qu'à CA en surface), de minéralogie des argiles (présence d'argile gonflante à CA seulement), de rapport C/N (supérieur à 18 à CA, inférieur à 16 à AZ en surface) et de taux de saturation en « bases » (29 et 63 % à 0-10 cm de profondeur à CA et AZ respectivement). Ces différences vont permettre d'identifier des dynamiques spécifiques de comportement mécanique vis-à-vis des contraintes externes, et de restauration de la porosité du sol.

Le climat général est similaire sur les deux sites, caractérisé par une température moyenne annuelle de 9 °C (AZ) et 9,5 °C (CA) et une pluviométrie moyenne de 900 mm (AZ) et 1 000 mm (CA).

Mise en place de l'essai

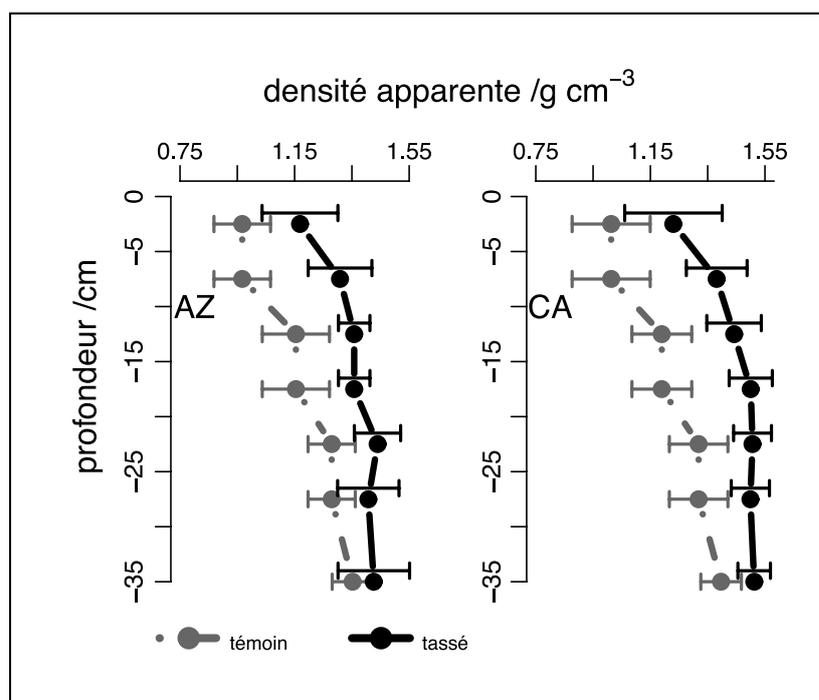
Sur chacun des sites, le peuplement précédent (futaie régulière de hêtre et chêne sessile avec un sous-étage de charme, de bouleau et tremble) a été coupé à blanc sur une surface de 5 à 6 ha, début 2007. Les bois ont été débardés par câble-mât et les rémanents restant après le débardage par câble ont été ramassés manuellement ou à l'aide d'un cheval de fer afin de limiter le plus possible les perturbations au sol et l'incorporation de bois dans le sol lors du passage ultérieur du porteur. Chaque site a été divisé en trois blocs en accord avec la cartographie des caractéristiques morpho-édaphiques et des propriétés physico-chimiques à grande échelle réalisée auparavant (13 fosses à CA

et 18 fosses à AZ). En mai 2007 (AZ) et mars 2008 (CA), un porteur forestier (tracteur VALMET 840, 8 roues motrices jumelées en boggie, avec berceau sur les 4 roues arrières, 11 t à vide) a compacté le sol en plein sur une bande de 30 × 50 m (les traces de roues sont adjacentes et pour chacune d'elle un aller-retour a été réalisé) dans chaque placeau tassé (T, trafficked) identifié au sein de chaque bloc (photo 1). L'engin, chargé de bois, pesait 23,3 t (AZ) et 16,7 t (CA) et ses pneumatiques (600/55 × 26.5) étaient gonflés à une pression de 360 kPa. La teneur en eau gravimétrique moyenne du sol au moment du passage de l'engin était de 33.9, 27.3 et 26.6 % à 0-10, 10-30 et 30-50 cm respectivement à AZ, alors qu'à CA elle était de 48.5, 31.7 et 27.2 % à 0-10, 10-30 et 30-50 cm respectivement. En moyenne la profondeur des ornières ainsi créées lors du passage du porteur était de 5 cm (calcul basé sur les différences de densité apparente entre le traitement tassé et témoin). L'augmentation de densité apparente juste après le passage du porteur est significative jusqu'à au moins 25 cm de profondeur (figure 1, Goutal et al. 2013b).

La plantation de chêne sessile a eu lieu en septembre 2007 (AZ) et septembre 2008 (CA) à raison de 1 600 plants ha⁻¹. A CA (site le plus acide), deux placeaux supplémentaires par bloc ont été mis en place pour tester l'intérêt d'un amendement calco-magnésien pour améliorer les conditions physico-chimiques, stimuler l'activité biologique et la régénération de la porosité du sol ; il s'agit des traitements A (témoin amendé) et TA (tassé amendé).

Figure 1 - moyenne et écart type des valeurs de densité apparente mesurées dans les traitements tassé (T) et témoin (C) juste après le passage du porteur forestier dans les sites d'Azerailles (AZ) et Clermont en Argonne (CA). 18 et 12 répétitions à AZ et 13 et 12 répétitions à CA par profondeur pour les traitements C et T respectivement.

Figure 1 - mean and standard deviation of soil bulk density immediately after traffic, as a function of depth (y-scale) and treatment (témoin ó control (C), tassé ó trafficked (T)) in the sites of Azerailles (AZ) and Clermont en Argonne (CA). 18 and 12 replicates per depth at AZ and 13 and 12 replicates per depth at CA for the control and trafficked treatments, respectively.



Instrumentation et fréquence de suivi des dispositifs

Chacun des sites a été équipé d'une station météorologique (mesure de la température, de la pluviométrie et de l'humidité relative de l'air) et de sondes insérées dans le sol pour suivre en continu le pédoclimat (température [sondes et data logger Campbell] et humidité [sondes TDR Trase system BE] : une mesure toutes les deux heures, 5 répétitions par site \times profondeur \times traitement dans un seul bloc, et 3 profondeurs suivies). La profondeur d'apparition de la nappe perchée temporaire est suivie en continu grâce à des sondes Diver distribuées à raison de deux répétitions dans les traitements T et C de chaque bloc.

Un suivi mensuel des phases gazeuses et liquides du sol a été mis en place. Des capteurs de l'atmosphère du sol mis au point dans l'Unité INRA EMMAH d'Avignon ont été répartis dans les 3 blocs \times 2 traitements (tassé et témoin) de chaque site (5 profondeurs prospectées), ils sont échantillonnés une fois par mois et les échantillons gazeux sont dosés au laboratoire par chromatographie en phase gazeuse (Varian) (Goutal *et al.*, 2012a et 2013a). Deux types de capteurs à solution sont prélevés une fois par mois ; i- des capteurs à eau libre (piézomètres répartis sur l'ensemble des sites) dont les solutions sont stabilisées directement sur le terrain puis dosées le lendemain au laboratoire, compte tenu de l'instabilité du fer ferreux et du manganèse réduit, et ii- des bougies poreuses (capteurs à eau faiblement liée à la phase solide, installés à trois niveaux dans le sol d'un seul bloc pour des questions d'alimentation électrique), gérées par un automate qui maintient une dépression constante de 400 hPa dont les solutions sont dosées au laboratoire.

Un suivi annuel des propriétés physiques du sol comprend des mesures de densité apparente (méthode du cylindre), résistance à la pénétration (PANDA[®], Sol Solution) et de structure (analyse d'image) sur les 3 blocs \times 2 traitements (tassé et témoin) de chaque site. Des relevés de flore (transects permanents), des communautés lombriciennes (Bottinelli *et al.*, 2014a) et de croissance et mortalité des chênes sessiles (en plein) sont réalisés une fois par an.

RÉSULTATS, SUIVI DE PARAMÈTRES PHYSIQUES

Pédoclimat

L'effet du tassement sur la température annuelle moyenne du sol n'est pas significatif sur les 3 (CA) à 4 (AZ) années de suivi (Goutal *et al.*, 2013a). Cependant, le sol tassé tamponne légèrement moins les variations de température par rapport au sol témoin, le sol se réchauffe et se refroidit plus fortement, même si les différences sont faibles et en moyenne de 0,6 °C

(CA) et 0,7 °C (AZ). Au contraire, l'effet du tassement sur l'humidité volumique du sol est significatif sur les 3 (CA) à 4 (AZ) années de suivi, en moyenne l'écart d'humidité volumique entre le traitement tassé et le traitement témoin est de 3 % (*figure 2*). On constate, de plus, une évolution de l'impact du tassement sur l'humidité volumique du sol dès l'apparition de la première sécheresse édaphique. A partir du moment où le porteur a circulé sur le sol et jusqu'à cette première sécheresse (juin 2008 à AZ et août 2009 à CA), le sol tassé est toujours plus humide que le sol témoin quelle que soit la saison. Après la première sécheresse, l'humidité volumique dans le traitement tassé n'est plus systématiquement plus forte que dans le témoin. En période de végétation, le traitement tassé montre des humidités volumiques plus faibles ou aussi faibles que le traitement témoin. Il semblerait ainsi que le fort dessèchement du sol ait conduit à l'apparition de fissures qui ont modifié le comportement hydrique dans le traitement tassé, en particulier en période de végétation. Cette hypothèse est confirmée par l'étude des autres propriétés du sol (macro porosité et composition de l'atmosphère du sol). En revanche, le suivi de la profondeur d'apparition de la nappe temporaire indique que le traitement tassé reste significativement concerné par un engorgement plus fréquent et plus intense que le traitement témoin, 3 (CA) à 4 (AZ) ans après tassement.

Densité apparente

Le suivi temporel indique une tendance à la restauration de la densité apparente en surface (0-10 cm), en particulier à CA où 3 ans après tassement aucun effet significatif sur la densité apparente n'est décelable en surface (*figure 3*). Aucune tendance en deçà de 10 cm de profondeur n'a pu être mise en évidence, l'effet du tassement est toujours significatif 3 (CA) et 4 (AZ) ans après tassement.

Toutefois, on peut constater que l'évolution de la densité apparente est variable et ne semble pas être affectée seulement par le processus de tassement/restructuration. En effet, on constate une forte corrélation entre l'humidité pondérale au moment du prélèvement et la densité apparente (*figure 4*), humidité qui est elle-même fortement variable d'un traitement à l'autre et d'une campagne de prélèvement à l'autre. Nous avons alors mesuré, sur un ensemble d'échantillons répartis sur l'ensemble du dispositif, les courbes de retrait (évolution du volume d'un échantillon de sol séchant à l'air depuis la saturation) pour déterminer la part de la relation densité apparente - humidité pondérale qui était effectivement liée à des phénomènes de gonflement-retrait et celle liée à d'autres effets (constituants du sol en particulier). Il s'avère que la relation entre densité apparente et humidité pondérale du sol est essentiellement liée aux constituants du sol, l'humidité pondérale à un moment donné étant fortement corrélée à ces constituants (Goutal *et al.*, 2012b). Ainsi, en normalisant les données de densité apparente par rap-

Figure 2 - Evolution de l'humidité volumique du sol à 15 cm de profondeur sur les sites d'Azerailles (AZ) et Clermont en Argonne (CA) dans les traitements témoin et tassé.

Figure 2 - Change in soil volumetric water content at 15 cm depth in the trafficked (tassé) and control (témoin) treatment of the sites of Azerailles (AZ) and Clermont en Argonne (CA).

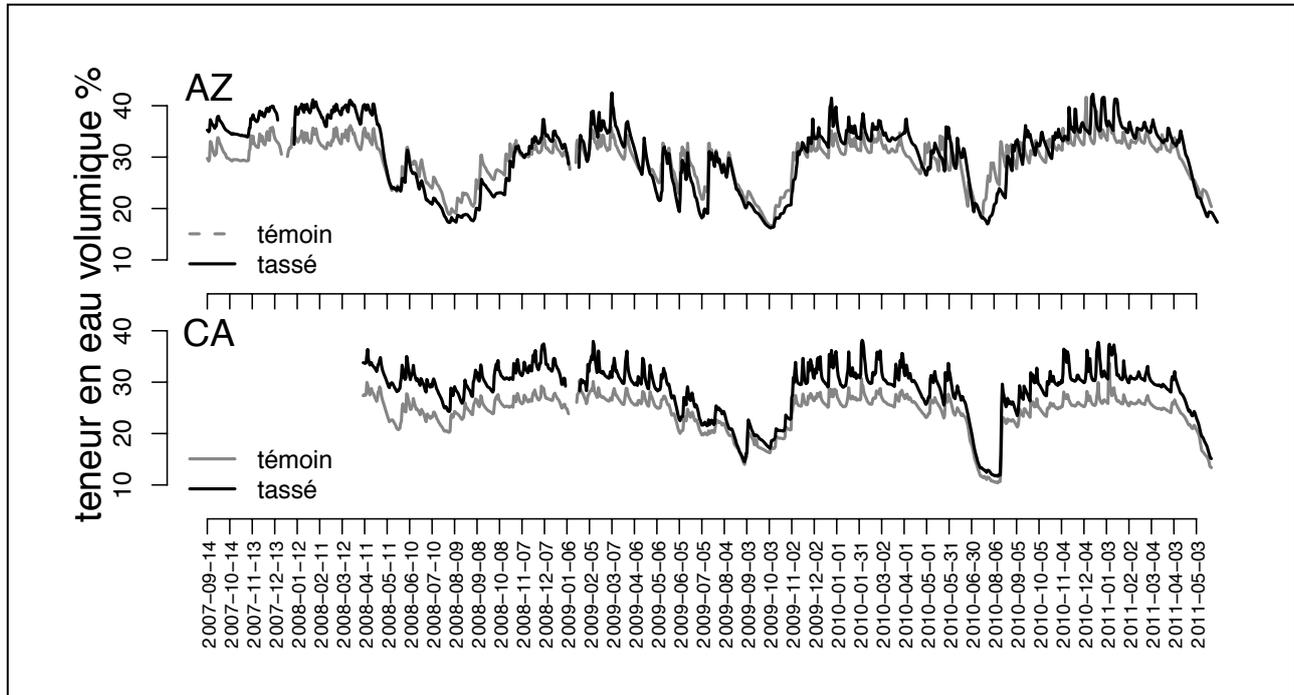


Figure 3 - Evolution de la densité apparente de surface (0-10 cm) sur les sites de Clermont-en-Argonne (CA) et Azerailles (AZ) dans les traitements témoin et tassé en fonction du nombre d'année après tassement (forest : avant mise en place du dispositif, t0 à t4 : juste après à 4 ans après tassement)

Figure 3 - Change in soil bulk density at 0 – 10 cm depth in the trafficked (tassé) and control (témoin) treatment of the sites of Azerailles (AZ) and Clermont en Argonne (CA) as a function of the number of year since compaction (forest : under previous forest cover, t0 to t4 : immediately to 4 years after compaction).

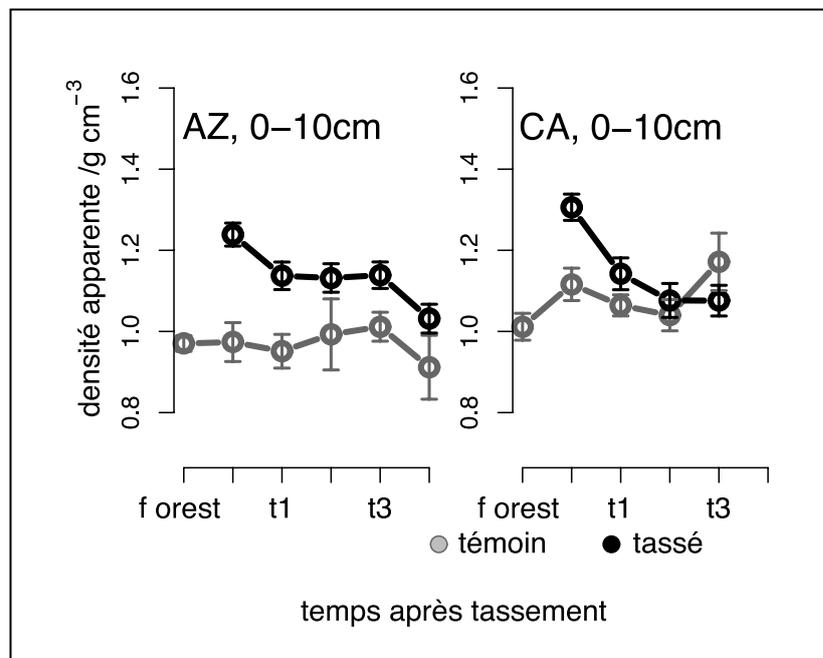
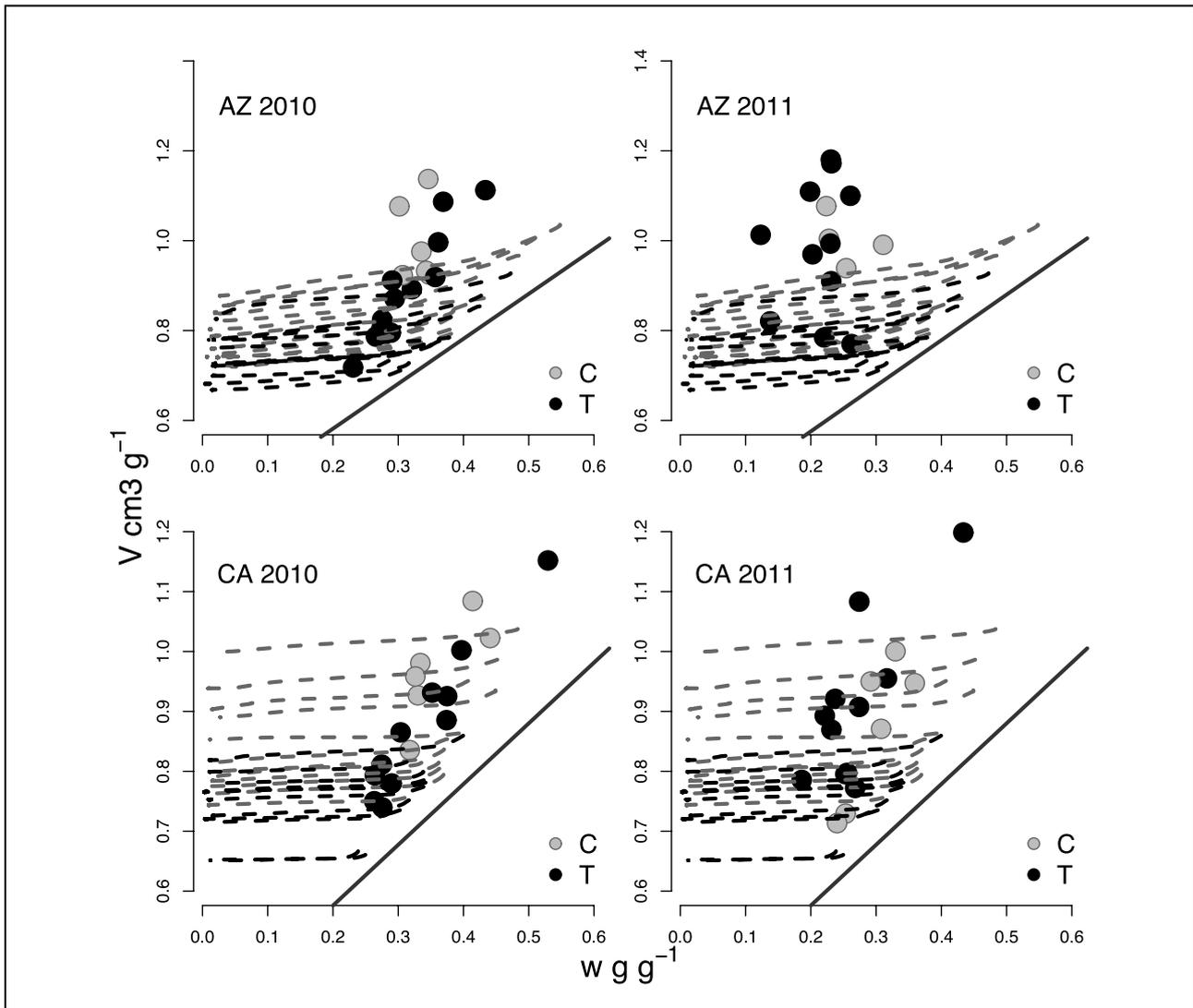


Figure 4 - Relation entre le volume spécifique ($V = 1/\text{densité apparente}$) et l'humidité gravimétrique (w) mesurés à Azerailles (AZ) et Clermont en Argonne (CA) à 5 cm de profondeur dans les traitements témoin (C) et tassé (T). Les points représentent les données issues des fosses acquises par la méthode du cylindre (mai 2010 et 2011) et les courbes correspondent aux courbes de retrait mesurées sur des échantillons répartis spatialement sur l'ensemble du dispositif (février 2011), chaque courbe correspondant à un échantillon différent et la ligne en gris foncé pleine correspondant à la ligne de saturation.

Figure 4 - Relationship between soil specific volume ($V = 1/\text{bulk density}$) and gravimetric water content (w). Comparison between soil specific volume measured in May 2010 and 2011 using the cylinder method (dot, corresponding to the control (C, light grey) and the trafficked (T, black) treatments), the shrinkage curves (dotted lines, light grey and black corresponding to the control and trafficked land strips, respectively) measured on soil sampled in February 2011 at 5 cm depth and the saturation line (grey solid line).



port à l'humidité pondérale du sol au moment du prélèvement, on normalise en quelque sorte cette mesure par rapport à la variabilité des constituants du sol.

La densité apparente est un indicateur fréquemment utilisé en Science du Sol, cependant il convient d'être très prudent avec les comparaisons de valeurs entre traitements, entre sites ou encore entre campagnes de mesure (mesure

destructrice donc les prélèvements successifs ne seront jamais au même endroit) si toutes choses ne sont pas égales par ailleurs (et notamment les constituants du sol, en particulier teneur en argile et en carbone). Ceci est particulièrement vrai pour les sols forestiers, toujours plus hétérogènes que les sols agricoles homogénéisés par le travail répété du sol depuis des années.

Sur les deux sites étudiés, on constate une évolution significative de l'impact du porteur sur la densité apparente de surface (0-10 cm) une fois celle-ci corrigée de l'effet de l'humidité pondérale. Cette évolution de l'impact du porteur sur la densité apparente est plus rapide à CA qu'à AZ, en lien probable avec des processus physiques (humectation/dessiccation, gel/dégel), la minéralogie des argiles et l'impact de la circulation du porteur sur la stabilité hydrostructurale (stabilité de la structure face à des contraintes internes causées par la diminution du potentiel hydrique lors de la dessiccation du sol ; Schäffer *et al.*, 2008) de la porosité, dans un système où l'agrégation est plus faible qu'à AZ.

Porosité : la macroporosité > 240 µm mesurée sur lames minces

Suite au tassement, à AZ comme à CA, la macroporosité a diminué en moyenne de 92, 68 et 49 % entre 0-7, 15-30 et 30-45 cm de profondeur (Bottinelli *et al.*, 2014b). La restauration de la macroporosité a eu lieu seulement sur les 7 premiers cm du sol. L'observation de lames minces associée à l'analyse d'images en 2D nous a permis d'identifier les processus sous jacents. Les macropores de petite taille (0.05-0,8 mm²) sont totalement régénérés au bout de 2 ans à CA et 3 ans à AZ, et correspondent en partie à l'action des racines. La macroporosité de grande taille (>0,8 mm²) quant à elle n'est que partiellement restaurée. De plus, elle est composée de fissures orientées parallèlement à la surface du sol, ce qui ne correspond pas aux macropores observés dans les placeaux témoins (*figure 5*). En relation avec l'étude du pédo-climat et la sensibilité de ces sols au retrait, nous en avons conclu que ces pores résultaient de processus essentiellement physiques (cycles gel/dégel et humectation/dessiccation). Les travaux de Goutal *et al.* (2012b) ont montré que la dynamique inter-annuelle de la densité apparente était plus importante à CA qu'à AZ, tandis que l'étude de la macroporosité montrait l'inverse, suggérant ainsi que les pores régénérés par les processus physiques sont de plus petite taille à CA qu'à AZ.

Résistance à la pénétration

Le suivi temporel de la résistance à la pénétration ne semble indiquer aucun retour de cette propriété à des valeurs analogues au sol non perturbé, y compris dans les horizons de surface, pendant les 4 années qui suivent le tassement. De plus, à CA on constate une augmentation de l'effet du tassement sur ce paramètre avec le temps (*figure 6*), en lien avec l'humidité pondérale des sols. En effet, 6 mois après tassement (campagne de novembre 2008), les sols à CA étaient très humides, voire engorgés dans le traitement tassé et aucun effet du traitement sur la résistance à la pénétration n'a pu y être mis en évidence, alors que lors des campagnes ultérieures (2 et 3 ans après tassement)

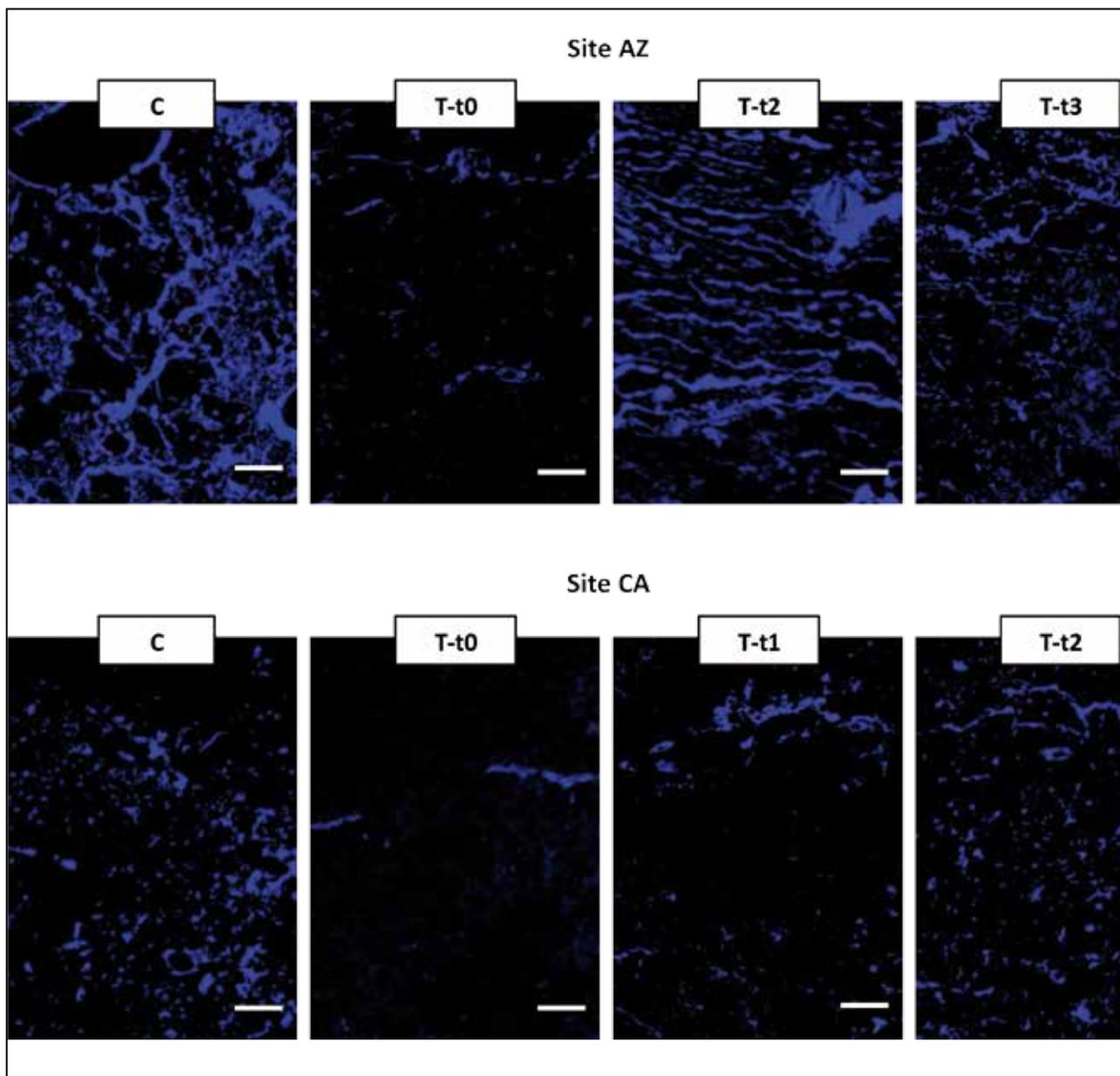
les sols étaient de plus en plus secs au moment de la mesure. A AZ, l'effet du tassement augmente également quand le sol devient sec, mais il apparaît quelles que soient les conditions d'humidité. L'évolution de la structure du sol constatée depuis le passage du porteur ne semble pas avoir modifié le comportement de prise en masse observé à CA. Une explication possible serait liée aux processus de restructuration au cours de cycles successifs d'humectation-dessiccation. En effet, Horn (2004) a observé que le réarrangement au sein même des agrégats, dû aux forces exercées aux interfaces eau-sol (ménisque), renforce la résistance mécanique des agrégats tout en diminuant leur densité. De plus, d'après l'analyse des lames minces de sol, la fissuration liée au dessèchement du sol se fait selon les plans de plus faible résistance qui sont parallèles à la surface du sol (structure lamellaire causée par le tassement) (Bottinelli *et al.*, 2014b). Ainsi la fissuration n'étant pas verticale, la résistance à la pénétration mesurée sur un axe vertical, pourrait ne pas être affectée par ce début de restauration des propriétés physiques.

Contrairement à la densité apparente, la variabilité spatiale des constituants du sol ne pose pas problème pour l'analyse du suivi temporel de la résistance à la pénétration. En effet, la mesure au pénétromètre est très peu destructrice et permet un suivi systématique comportant beaucoup de points de mesure par traitement, « aux mêmes endroits » d'une année à l'autre (10 à 15 points de mesure par traitement et par bloc ont été réalisés à chaque campagne). Par contre, la mesure au pénétromètre est très dépendante de l'humidité au moment de la mesure et le biais de suivi constaté sur les deux sites (augmentation de l'effet du tassement), lié au fait que depuis le tassement les mesures ont eu lieu dans des conditions de plus en plus sèches, n'a pas pu être complètement corrigé en normalisant la résistance à la pénétration par rapport à l'humidité pondérale. En effet, la variabilité de l'humidité pondérale propre à chaque campagne de mesure est faible par rapport à celle des teneurs en eau toutes campagnes confondues. La relation entre la résistance à la pénétration et l'humidité pondérale du sol n'étant pas linéaire, les relations calibrées pour chaque année, profondeur et traitement ne sont, de la sorte, que peu extrapolables à l'ensemble des teneurs en eau. Par conséquent, l'effet du facteur temps depuis la compaction est encore probablement quelque peu corrélé à la variation de l'étendue des teneurs en eau explorée chaque année, problème inhérent aux études de terrain où le contrôle des conditions d'humidité est difficile. Quoi qu'il en soit, l'effet du tassement toujours visible sur les mesures brutes montre bien que dans certaines conditions d'humidité, l'effet du tassement est toujours apparent sur la résistance physique du sol.

L'amendement calco-magnésien n'a pour l'instant pas diminué l'impact du tassement sur la résistance à la pénétration des sols (*figure 6*), il est assez normal que l'effet de la remédiation par amendement ne soit visible qu'au bout d'un laps de temps plus long (Ampoorter *et al.*, 2011). De plus, l'humidité pondérale des sols amendés (témoin et tassé) était plus faible en juin 2011

Figure 5 - Photographies de sections de sols polies, orientées verticalement, sous lumière violette. Les échantillons ont été prélevés dans les placeaux témoins (C) et tassés (T), à Azerailles (AZ) et Clermont en Argonne (CA), entre 0-7 cm de profondeur, immédiatement après tassement jusque 3 ans après. La macroporosité apparaît en bleu. Les barres d'échelle représentent 2 mm.

Figure 5 - Macrophotographs of vertically-oriented polished sections under ultraviolet illumination of soil sampled in control (C) and traffic (T) plots at Azerailles (AZ) and Clermont-en-Argonne (CA) sites in the 0-7 cm soil depth after 2 – 3 years. Macropores appear blue and bar scales represent 2 mm.

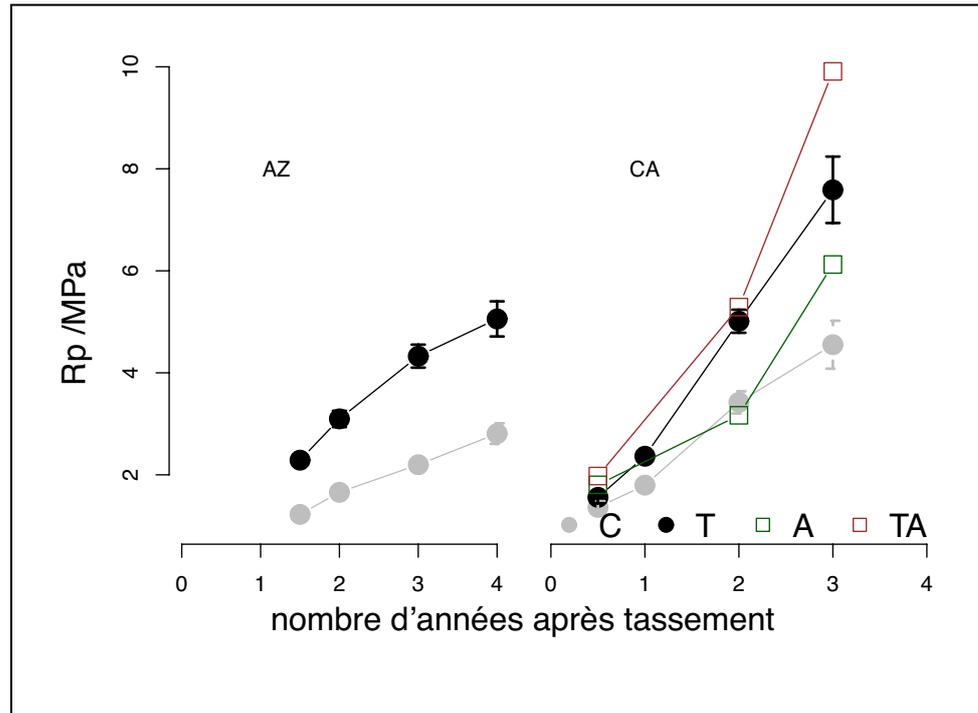


que celle des sols non amendés, probablement en relation avec une consommation d'eau plus forte et/ou une modification des transferts hydriques. Par conséquent, logiquement, leur résistance à la pénétration était plus élevée que celle des sols non tassés. Normalement l'apport de cations devrait favoriser l'agrégation et diminuer la résistance à la pénétration (Ampoorter et

al., 2011). Il est indispensable de continuer à comparer les traitements amendés avec les traitements non amendés, pour tester si la différence de résistance à la pénétration est seulement liée à une différence d'humidité ou si un autre processus intervient.

Figure 6 - Evolution de la résistance à la pénétration des sols (R_p) de 5 à 10 cm de profondeur dans les traitements témoin (C), tassé (T), témoin amendé (A) et tassé amendé (TA) des sites d'Azerailles (AZ) et Clermont-en-Argonne (CA), moyenne et erreur standard.

Figure 6 - Mean and standard error of soil resistance to penetration (R_p) at 5 – 10 cm depth as a function of the number of year since compaction (x-axis) and of the treatment (C \Leftrightarrow control, T \Leftrightarrow trafficked, A \Leftrightarrow control with lime, TA \Leftrightarrow trafficked with lime) in the sites of Azerailles (AZ) and Clermont-en-Argonne (CA).



SUIVI DE PARAMÈTRES CHIMIQUES

Atmosphère du sol

Pour les deux sites, on constate un effet initial très fort du tassement sur la composition de l'atmosphère du sol. En effet, on observe une augmentation de la concentration en CO_2 (figure 7) et une diminution de la concentration en O_2 dans le traitement tassé par rapport au traitement témoin quelles que soient les conditions de diffusion (indiquées par le paramètre de porosité libre à l'air) et/ou les conditions d'activité biologique (indiquées par le paramètre de température du sol et/ou de flux de CO_2). Il semblerait que le tassement ait créé une couche de sol imperméable aux transferts gazeux quelles que soient les conditions d'humidité (normalement les conditions de transfert gazeux sont plus favorables dès lors que les sols sont secs).

Cet effet initial disparaît dès l'apparition de la première sécheresse édaphique (Goutal et al., 2013a ; figure 7).

Après cet effet initial, l'impact du tassement alterne entre une augmentation et une diminution de la teneur en CO_2 par rapport au traitement témoin selon les conditions d'humidité et de température du sol (idem pour O_2 mais avec des effets inversés par rapport au CO_2 , une augmentation en CO_2 correspondant généralement à une diminution en O_2). Dans les sols tassés, l'activité biologique réduite mise en évidence par des flux de CO_2 limités, produit peu de CO_2 qui pourtant peut s'ac-

cumuler dès lors que les conditions de diffusion sont mauvaises (période hivernale) alors qu'en période de végétation le sol tassé contient moins de CO_2 dans son atmosphère que le sol témoin (conditions de diffusion non limitantes) (Goutal et al., 2012a). Ainsi l'apparition de la première sécheresse édaphique depuis le tassement semble avoir induit une fissuration du sol tassé qui permet une augmentation des transferts gazeux par rapport à la phase initiale juste après tassement, toutes choses étant égales par ailleurs (Goutal et al., 2013a). Ce constat est cohérent avec les observations précédentes (suivi de l'humidité, de la porosité et de la densité du sol). Les effets du tassement perdurent sur cet indicateur, 3 ou 4 années après l'application de la contrainte.

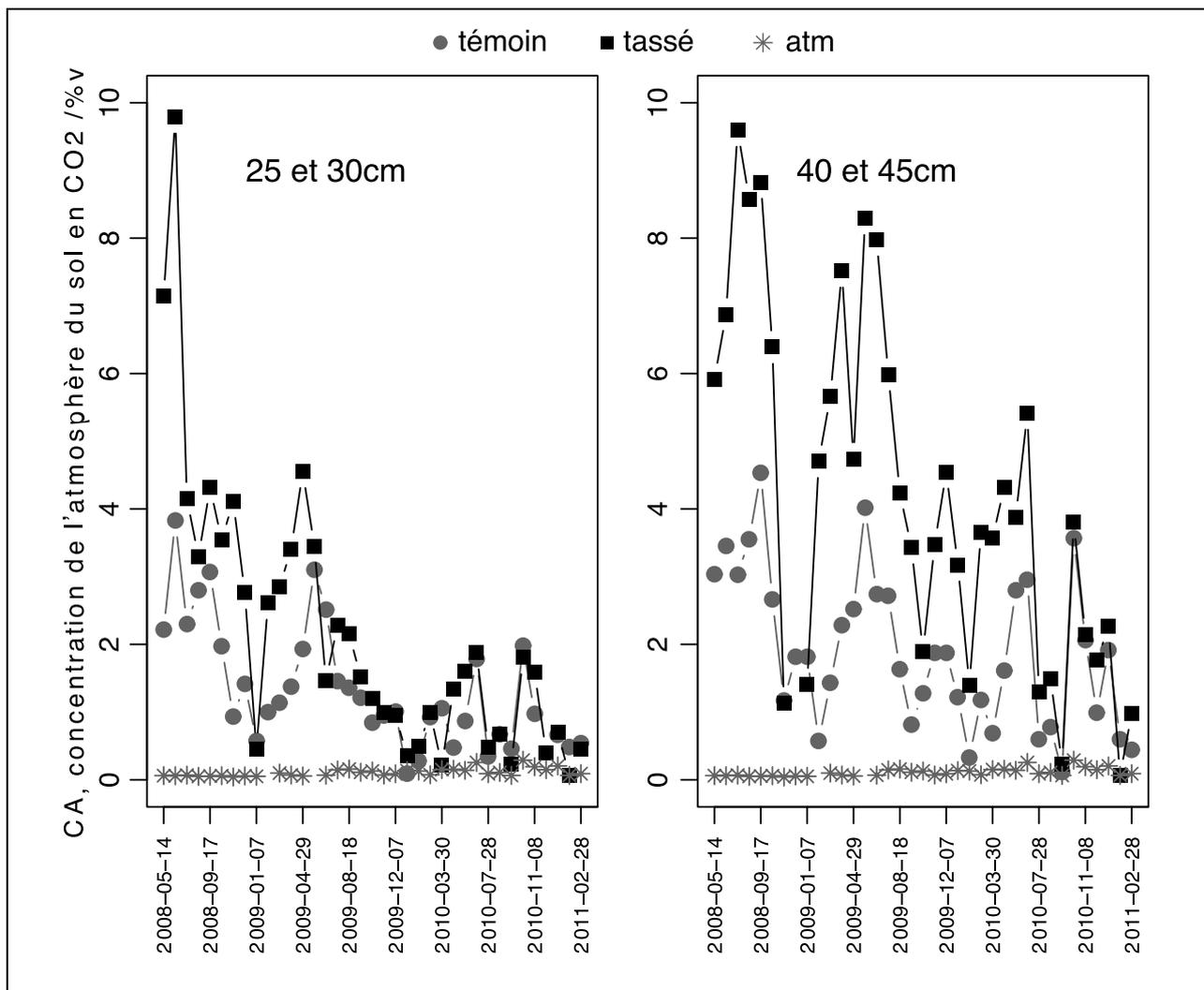
Solutions de sol

La composition des eaux de nappe démontre un engorgement temporaire et une hypoxie mobilisant du fer sous forme de fer ferreux plus fréquemment et plus intensément (apparition dès les horizons de surface avec des concentrations élevées) dans le traitement tassé par rapport au traitement témoin.

Le suivi des solutions libres et liées montre des différences notables d'impact de la déstructuration du sol sur la chimie de ces solutions en fonction du site, mais ne permettent pas à l'heure actuelle de conclure quant à l'évolution de cet impact (forte variabilité de la composition des eaux du sol). On constate un effet significatif de l'amendement sur les solutions liées dans les deux traitements (témoin et tassé) à CA, en particulier sur la

Figure 7 - évolution de la concentration de l'atmosphère du sol en CO_2 en fonction du traitement sur le site de Clermont-en-Argonne (CA), à 30 cm (gauche) et 45 cm (droite) de profondeur (différence de 5 cm entre les capteurs du traitement tassé et ceux du traitement témoin pour suivre la même couche de sol dans les deux cas).

Figure 7 - Temporal change in soil atmosphere concentration in CO_2 in the trafficked (tassé) and control (témoin) treatment of the site of Clermont-en-Argonne (CA) at 30 cm (left) and 45 cm (right) depth (5 cm depth interval between the two treatments in order to investigate the same soil layer).



forte réduction des nitrates en solution. Des études complémentaires en cours (suivi de la minéralisation de l'azote, par exemple), permettront de mieux comprendre l'effet de ce traitement. Il est toutefois intéressant de noter que si l'effet de l'amendement sur les propriétés physique du sol n'est pas immédiat, il est très rapide en ce qui concerne la composition des solutions du sol.

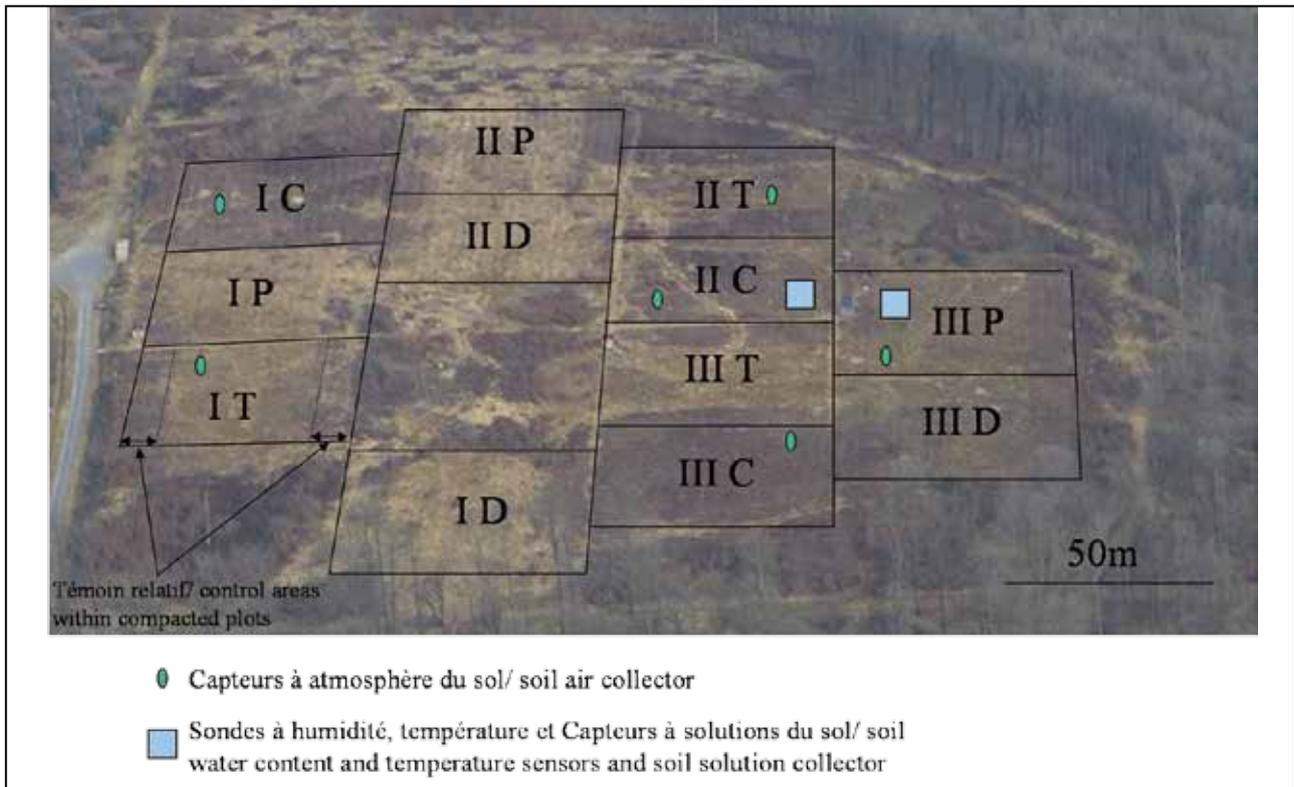
SUIVI DE PARAMÈTRES BIOLOGIQUES

Flore

Quelques mois après le passage de l'engin, la flore s'est modifiée de manière spectaculaire sur le site d'AZ, les zones tassées étant envahie par le jonc (*Juncus* sp.) et les zones témoins par la ronce (*Rubus fruticosus*). Cet effet est toujours visible 4 ans après tassement même si, dans le traitement tassé,

Photo 1 - photo aérienne du dispositif expérimental d'Azerailles, on peut distinguer les zones claires des zones foncées correspondant respectivement aux forts recouvrements de la glycérie et de la ronce, crédit photo : Christophe Bailly, mars 2012. I, II and III correspondent aux numéros des blocs et les lettres désignent les différents traitements ; C pour le traitement témoin, T pour le traitement tassé, D pour le traitement tassé et décompacté par cover crop, P pour le traitement tassé et décompacté par potet au profit des plants

Picture 1 - aerial picture of the experimental site of Azerailles, light areas can be distinguished from dark areas, corresponding respectively to the dominance of *Glyceria striata* and *Rubus fruticosus*, credit : Christophe Bailly, March 2012. I, II and III correspond to the block numbers and the following letters name the different treatments ; C stand for the control, T for the trafficked, D for the trafficked and alleviated thanks to the cover crop technique and P for the trafficked and alleviated thanks to the potet technique in favour of the seedlings treatments.



la glycérie (*Glyceria striata*) prend de l'importance aux dépens du jonc en recouvrement (*photo 1*). A CA, la même tendance de substitution de flore existe, mais de manière plus discrète, le jonc étant également présent dans les traitements témoins et la ronce dans les traitements tassés. De plus, l'effet de l'amendement sur la flore est très modéré. Sur ce site, la végétation ne semble pas être un bon indicateur de l'état physique du sol, le suivi à long terme du sol et de la végétation nous permettra probablement d'apporter des éléments de compréhension de cette divergence.

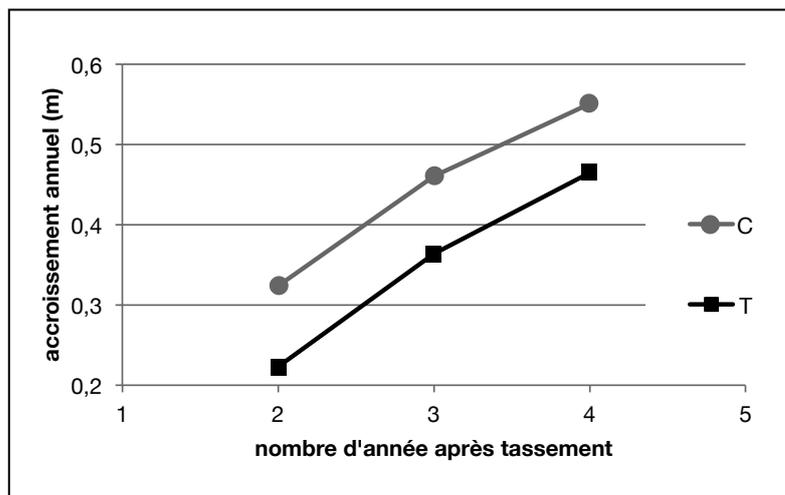
Mortalité et croissance du chêne sessile

Le suivi des peuplements de chêne sessile plantés sur les deux sites montre que le passage du porteur a fortement aug-

menté la mortalité sur les 4 années qui ont suivi à AZ, alors que cet impact est plus modéré sur les 3 années qui ont suivi à CA. La différence d'impact est surtout visible lors de la première année après plantation et peut s'expliquer, en partie, par les différences de mésoclimat observées lors de la première saison de végétation et subies par les peuplements (printemps 2008 très humide pour AZ, printemps 2009 beaucoup moins humide pour CA). La mortalité à CA a été supérieure dans les traitements amendés par rapport aux traitements non amendés respectifs. Le suivi de l'accroissement annuel en hauteur montre également un fort impact du tassement qui diminue la croissance des peuplements à AZ (*figure 8*), cet effet est plus modéré à CA même s'il est encore trop tôt pour conclure, les plants à CA sortant à peine de la crise de transplantation. A l'heure actuelle, aucun effet de bordure n'a pu être mis en évidence laissant penser que l'effet

Figure 8 - accroissement annuel en hauteur des chênes sessiles plantés sur le site d'Azerailles à l'automne 2007 en fonction du traitement (C \Leftrightarrow témoin, T \Leftrightarrow tassé) et du nombre d'années depuis le tassement.

Figure 8 - Annual height increment (y-axis) of the sessile oaks planted at the Azerailles site in the fall of 2007 as a function of treatment (C \Leftrightarrow control, T \Leftrightarrow trafficked) and of the number of years since compaction (x-axis).



bénéfique de la proximité des zones non perturbées va être plus long à se déclarer.

La morphologie des systèmes racinaires a été étudiée à AZ en 2011 (4 ans après tassement), montrant que la profondeur du système racinaire est moindre, les racines de structure sont moins nombreuses et plus petites en diamètre, et le pivot est absent dans le traitement tassé par rapport au traitement témoin (Fatré, 2012). Ces différences traduisent un ancrage moins fort suite au passage de l'engin qui pourrait se traduire par une sensibilité accrue à des événements climatiques extrêmes.

Le suivi des peuplements de chêne sessile ne permet pas, à l'heure actuelle, de conclure à une restauration du sol qui soit suffisante pour modifier l'impact négatif du tassement sur l'enracinement, la mortalité et la croissance des peuplements. A AZ, l'indicateur mixte mortalité x croissance en hauteur montre un effet très négatif persistant du tassement. Compte tenu de la mortalité, il est probable que la productivité à long terme soit altérée.

Biologie sol : les communautés lombriciennes

Suite au tassement, l'abondance des communautés lombriciennes mesurée sur les 30 premiers cm du sol diminue de 72 % à CA et 94 % à AZ (figure 9 ; Bottinelli et al., 2014a). Cette diminution est imputée d'une part à l'effet « direct » de la pression exercée par le débardeur sur les lombriciens et d'autre part à l'effet « indirect » de la réduction de l'habitat des lombriciens. A CA, les communautés lombriciennes représentées exclusivement par les espèces épigées (*Lumbricus castaneus* et en moindre mesure *Lumbricus rubellus*) sont restaurées au bout de 3 ans. Alors qu'à AZ, les communautés lombriciennes représentées majoritairement par les espèces endogées (*Aporrectodea caliginosa* et *Allolobophora rosea*), et en moindre mesure

par l'espèce anécique (*Lumbricus terrestris*) et l'espèce épigé (*Lumbricus castaneus*) n'ont montré aucun signe de restauration significatif après 4 ans. Ces résultats s'expliquent en partie par la faible différence de végétation et de structure du sol entre les placeaux tassés et témoins à CA en comparaison à AZ. Nous avons montré également au cours de cette étude qu'à AZ les lombriciens n'étaient pas capables de coloniser les placeaux tassés depuis les placeaux témoins (figure 9 : T-bord vs. T). Ce dernier résultat indique que la qualité du sol (matière organique et structure du sol par exemple) dans le traitement tassé n'est pas propice aux lombriciens.

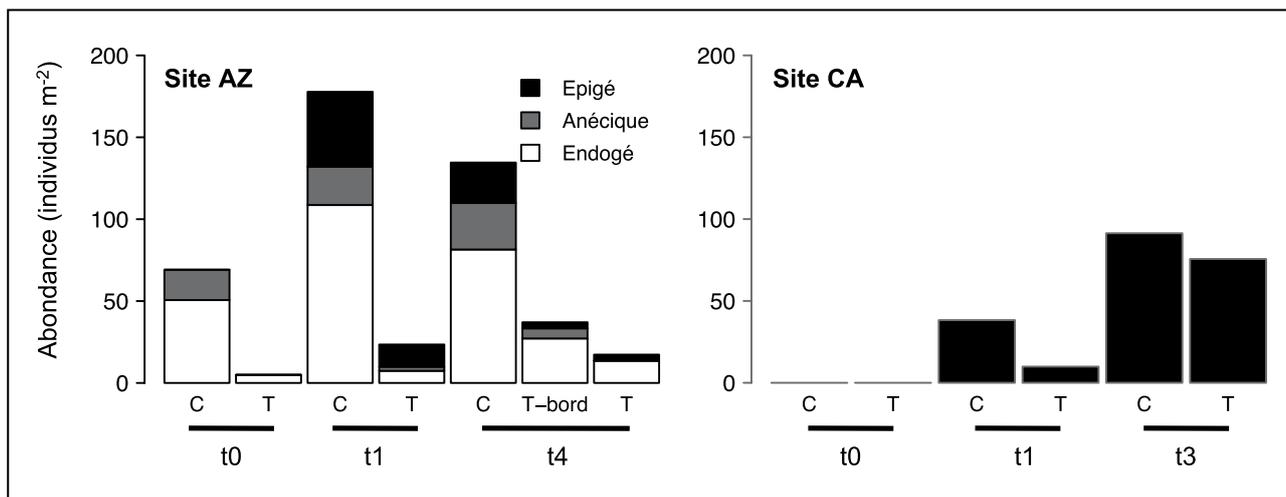
CONCLUSION

Sur les deux sites suivis, un orniérage modéré suite à la circulation d'un porteur a conduit à une modification drastique du fonctionnement des sols et de l'écosystème associé. Non seulement la déformation du sol sous les roues du porteur a dégradé la structure du sol (diminution de la macroporosité, augmentation de la densité apparente et de la résistance à la pénétration), mais elle a également augmenté l'engorgement temporaire et le déficit d'aération des sols modifiant son activité biologique et la chimie des fluides des sols. Ces effets concourent à limiter les potentialités d'enracinement des chênes, ce qui peut s'exprimer sur la croissance de manière variable selon le climat mais, sur le long terme, crée un risque fort de mauvaise adaptation face aux événements climatiques extrêmes.

Le couplage des approches physiques, chimiques et biologiques a permis de mieux comprendre l'impact de la déstructuration du sol sur son fonctionnement et sa dynamique initiale de restauration. Tous les paramètres suivis ont apporté un éclairage distinct et complémentaire sur la dégradation du sol et sa restauration en raison de leur sensibilité spécifique.

Figure 9 - Abondance des lombriciens classés en 3 catégories écologiques sur les sites d'Azerailles (AZ) et de Clermont en Argonne (CA) au centre des placeaux contrôles (C), des placeaux tassés (T) et en bordure des placeaux tassés (T-bord) et en fonction du nombre d'année après tassement (t0 à t4 : immédiatement jusque à 4 ans après tassement). Les barres représentent les écarts types (n = 3).

Figure 9 - Abundance of earthworms classified in the three ecological groups at Azerailles (AZ) and Clermont en Argonne (CA) in the centre of control (C), trafficked (T) plots and at the edges of trafficked plots (T-bord) as a function of the number of year since compaction (t0 to t4 : immediately to 4 years after compaction). The bars represent the standard deviation (n = 3).



Cette étude a également permis de mettre en évidence la difficulté de suivre les propriétés physiques nécessitant une mesure destructrice et/ou celles dont la mesure est fortement influencée par la teneur en eau du sol. De nouvelles techniques (terrain, statistiques) doivent être développées pour éviter les biais lors du suivi de ces propriétés. En effet, il est nécessaire d'identifier les interactions entre les propriétés affectées par le processus étudié et/ou le temps et de normaliser l'indicateur suivi par rapport à ces autres paramètres pour assurer la comparabilité des études et/ou des mesures d'une période à l'autre.

Un début de restauration de la structure du sol a été constaté en surface à AZ et CA (3 et 4 ans après tassement, respectivement) sans que tous les paramètres suivis n'indiquent un retour complet à leur état initial. Ce début de restauration est lié à des processus physiques d'humectation/dessiccation et gel/dégel, même sur le site le moins acide (AZ) où les lombriciens sont bien représentés mais fortement affectés par le tassement. On constate également que les processus physiques ont eu un impact différent sur la structure du sol selon le site en lien étroit avec la quantité d'argile (supérieure à AZ qu'à CA) et leur minéralogie (argile gonflante seulement à CA). A CA, les processus de régénération de la structure semblent avoir surtout agi au niveau de la microporosité, ce qui est en accord avec une forte capacité de gonflement/retrait du plasma (analysée sur les courbes de retrait), alors qu'à AZ ils auraient agi pour tout le spectre des pores. Le suivi à long terme des sites devrait permettre de tester l'hypothèse d'une divergence des comportements en restaura-

tion des deux sites, selon leur richesse chimique et biologique spécifique. A CA, l'effet bénéfique de l'amendement sur la régénération de la structure devrait également s'exprimer à plus long terme.

Les horizons moyens et profonds sont toujours significativement dégradés, ce qui pourrait à terme conduire à une « inversion de profil ». En effet, les couches de surface sont plus tassées que les couches profondes juste après le passage de l'engin puis avec le temps, les couches profondes restent compactes alors que les couches de surface se restaurent, ce qui conduirait à un syndrome voisin de la semelle de labour en agriculture.

BIBLIOGRAPHIE

- Ampoorter E., De Schrijver A., De Frenne P., Hermy M. et Verheyen K., 2011 - Experimental assessment of ecological restoration options for compacted forest soils. *Ecological Engineering*, 37, pp. 1734-1746.
- Badeau V., Dambrine E. et Walter C., 1999 - Propriétés des sols français : Résultats du premier inventaire systématique. *Etude et Gestion des Sols*, 6, 3, pp. 165-180.
- Blanco-Canqui H., Lal R., Owens L.B., Post W.M. et Izaurralde R.C., 2005 - Strength properties and organic carbon of soils in the north Appalachian region. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 69, pp. 663-673.
- Bottinelli N., Capowiez Y. et Ranger J., 2014a - Slow recovery of earthworm populations after heavy traffic in two forest soils in northern France. *Appl. Soil Ecol.*, 73, pp. 130-133.
- Bottinelli N., Hallaire V., Goutal N., Bonnaud P. et Ranger J., 2014b - Impact of heavy traffic on soil macroporosity of two silty forest soils : initial effects and short term recovery. *Geoderma*, 217-218, pp. 10-17.
- Curran M.P. et Howes S.W., 2011 - Soil disturbance concerns regarding the use of forest biomass as a source of energy : Examples from Pacific Northwestern North America. *Biomass and Bioenergy*, 35, 11, pp.4547-4556.
- 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 restauration mécanique et chimique, observations réalisées sur deux sites expérimentaux en Lorraine. Mémoire de BTS de Gestion Forestière. Mirecourt, 33p.
- Goutal N., Parent F., Bonnaud P., Demaison J., Nourrisson G., Epron D. et Ranger J., 2012a - Soil CO₂ concentration and efflux as affected by heavy traffic in forest in northeast France. *Eur. J. Soil Sci.*, 63, 2, pp.261-271.
- Goutal N., Boivin P. et Ranger J., 2012b - Assessment of the natural recovery rate of soil specific volume following forest soil compaction. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 76, 4, pp.1426-1435.
- Goutal N., Renault P. et Ranger J., 2013a - Forwarder traffic impacted over at least four years soil air composition of two forest soils in northeast France. *Geoderma*, 193-194, pp. 29-40.
- Goutal N., Keller T., Défossez P. et Ranger J., 2013b - Soil compaction due to heavy forest traffic : measurements and simulations using an analytical soil compaction model. *Annals For. Sci.*, 70, pp. 545-556.
- Horn R., 2004 - Time dependence of soil mechanical properties and pore functions for arable soils. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 68, 4, pp. 1131-1137.
- Horn R., Vossbrink J., Peth S. et Becker S., 2007 - Impact of modern forest vehicles on soil physical properties. *For. Ecol. Management*, 248, pp. 56-63.
- Miller R.E., Colbert S.R. et Morris L.A., 2004 - Effects of heavy equipment on physical properties of soils and on long-term productivity-a review of literature and current research. Technical bulletin, 887, N.C.A.S.I., Research Triangle Park, N.C, 90 p.
- Ranger J., Goutal N., Gelhaye D., Bonnaud P., Nourrisson G., Demaison J., Lefevre Y. et Brêthes A. 2010. 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 technique annuel, INRA Champenoux, Biogéochimie des Ecosystèmes Forestiers, 60p.
- Roger-Estrade J., Adamiade V., Arrouays D., Baranger E., Bartoli M., Boizard H., Brêthes A., Brisson N., Capowiez Y., Chanzy A., Chaplain V., Cousin I., Cosenza P., Cui K., Cui Y.-J., Debuisson D.S., Défossez P., Gérard F., Jayet P.A., Labreuche J., Le Bas C., Lefèvre Y., Léonard J., Lévêque E., Lévêque F., Mary B., Mumen M., Ranger J., Tabbagh A., Tabbagh J., Tang A.-M., Tessier D. et Richard G., 2011 - Dégradation physique des sols agricoles et forestiers liée au tassement : principaux résultats du projet GESSOL-ADD DST. *Etude et Gestion des Sols*, 18, 3, pp.187-189.
- Schäffer B., Schulin R. et Boivin P., 2008 - Changes in shrinkage of restored soil caused by compaction beneath heavy agricultural machinery. *Eur. J. Soil Sci.*, 59, pp. 771-783.

PUBLICATIONS ET DOCUMENTS PUBLIÉS PAR L'AFES

Revues

Science du Sol

Revue scientifique publiée de 1952 à 1993.

Elle comporte 300 à 400 pages par an. Un index est présenté tous les ans dans le quatrième numéro.

A cessé de paraître fin 1993. Certains numéros disponibles.

La Lettre de L'Association

Publiée quatre fois par an, ce journal annonce les nouvelles de l'association, les réunions nationales et internationales ; il donne des critiques d'ouvrages, de thèses, de la documentation, etc.

La Lettre est envoyée à chaque adhérent de l'association : elle accompagne l'adhésion.

Rédacteur en chef : F. Féder.

Etude et Gestion des Sols

Revue trimestrielle, francophone traitant de la connaissance et de l'usage des sols.

Rédacteur en chef : D. Arrouays.

Rédacteurs en chef Adjoints : D. Baize, D. Schwartz

Secrétariat de rédaction : F. Héliès, C. Laveuf, J.-P. Rossignol.

Le Comité éditorial est composé de trente six membres de France et de pays francophones.

Ouvrages

Le Livre Jubilaire (1984)

Point sur les acquis à cette date en matière de science du sol et de pédologie.

Fonctionnement hydrique et comportement du sol (1984)

Podzols et podzolisation

par D. Righi et A. Chauvel : ouvrage publié en coédition par l'AFES et l'INRA, avec le concours du CNRS, de l'ORSTOM, et de la région Poitou-Charentes (1987).

Micromorphologie des sols/ Soil micromorphology

par N. Fédoroff, L.M. Bresson, Marie Agnès Courty, publié par l'AFES avec le concours du CNRS, de l'INAPG, de l'INRA, du Ministère de l'Environnement et de l'ORSTOM (1985) (épuisé).

Carte mondiale des sols et sa légende (1984)

Présentée sous forme numérique.

Le Référentiel Pédologique

par D. Baize et M.-C. Girard, (Coord.) AFES, Association Française pour l'Etude du Sol (FRA), Editions Quae, Versailles (FRA) ; 2009. 405 p. - Collection Savoir-Faire.

Synthèse nationale des analyses de terre: Période 1990-1994

par C. Walter, C. Schwartz, B. Claudot, P.-Aurousseau et T. Bouedo, avec le concours du Ministère de l'Agriculture et de la Pêche.

Actes du XVI^e Congrès Mondial de Sciences du Sol, Montpellier - Août 1998