



HAL
open science

Effet du tassement sur les sols et peuplements : synthèse des résultats à 10 ans sur deux sites expérimentaux dédiés

Noémie Pousse, Arnaud Legout, Frédéric Darboux, Jacques Ranger

► To cite this version:

Noémie Pousse, Arnaud Legout, Frédéric Darboux, Jacques Ranger. Effet du tassement sur les sols et peuplements : synthèse des résultats à 10 ans sur deux sites expérimentaux dédiés. Rendez-vous Techniques de l'ONF, 2023, 77, pp. 36-45. hal-04028259

HAL Id: hal-04028259

<https://hal.science/hal-04028259>

Submitted on 14 Mar 2023

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

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

Effet du tassement sur les sols et peuplements : synthèse des résultats à 10 ans sur deux sites expérimentaux dédiés

Le dispositif expérimental dédié à l'étude de l'effet du tassement sur les sols a près de 15 ans. L'analyse des mesures à 10 ans a donné des résultats parfois contrastés et difficiles à interpréter. Mais il en ressort surtout que, même dans ce cas de tassement modéré, les effets à moyen terme sont toujours très marqués tandis que les processus d'évolution naturelle sont plutôt discrets et les essais de remédiation « partiellement efficaces ».

Le passage d'un engin en forêt est aujourd'hui un événement qui apparaît banal à beaucoup. Les mesures réalisées depuis 2007 sur un dispositif expérimental dédié dressent pourtant un tout autre portrait, avec en particulier des conséquences à long terme, tant sur le sol que sur les arbres.

Deux sites expérimentaux de suivi à long terme des effets du tassement, mis en place par INRAE avec le soutien de l'ONF, ont permis de mettre en évidence les processus initiaux de dégradation des sols suite à deux passages d'un porteur de 20 t en charge (Goutal Pousse *et al.*, 2014). Un suivi continu depuis la mise en place de ce dispositif permet d'actualiser les connaissances sur la dynamique d'évolution naturelle des sols et de la croissance des peuplements pendant les 10 premières années après tassement. La dégradation des sols et de leurs fonctions est très rapide, la restauration est quant à elle très lente, partielle et assez délicate à déchiffrer.

1 Des sites expérimentaux pour étudier l'évolution des sols et des peuplements après circulation d'un porteur

Les deux sites expérimentaux du dispositif sont situés sur des sols similaires issus d'un placage limoneux de 50 cm environ sur une argile, avec quelques traces témoignant de la présence d'une nappe perchée temporaire entre 40 et 50 cm de profondeur. Le premier site, mis en place en 2007, est situé en forêt domaniale des Hauts-Bois sur la commune d'Azerailles (54) ; il est nommé ci-après AZ. Le second, mis en place en 2008, se trouve en forêt domaniale de Grand Pays sur la commune de Clermont-en-

Argonne (55) ; il est nommé ci-après CA. Le climat général est similaire sur les deux sites, distants de 170 km, avec 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). Le sol est moins acide à AZ qu'à CA avec, entre 0 et 10 cm de profondeur, un pH de 4.8 à AZ contre 4.4 à CA. Le sol de surface à AZ est également plus riche en éléments nutritifs qu'à CA, alors que c'est l'inverse dans les horizons argileux en profondeur en lien avec une meilleure stabilité des agrégats dans les horizons de surface à AZ (Bedel *et al.*, 2018).

Pour les deux sites, une coupe rase a été réalisée et les bois ont été débordés par câble-mât pour ne pas perturber le sol. Aucun engin n'a donc circulé sur le traitement témoin ; le traitement tassé correspond à l'unique aller-retour après débordage d'un porteur d'environ 20 t en charge, dans des conditions de sol frais à humide, occasionnant une diminution de hauteur du sol d'environ 5 cm (Goutal Pousse *et al.*, 2014).

À AZ, deux traitements de remédiation mécanique après tassement ont été testés : le semi-labour en plein au cover crop (disques de 20 cm de diamètre) et le travail localisé en potet au profit du plant (dent Becker montée sur mini-pelle). À CA, on a testé le semi-labour en plein au cover crop et un traitement 'chimique' par amendement calco-magnésien.

Enfin, les deux sites ont été plantés avec du chêne sessile à une densité de 1600 plants/ha.

Les placeaux expérimentaux mesurent 30 m x 50 m et sont répliqués trois fois afin de permettre le suivi temporel à long terme (cf. variabilité spatiale des sols, mesures destructrices) et des analyses statistiques.

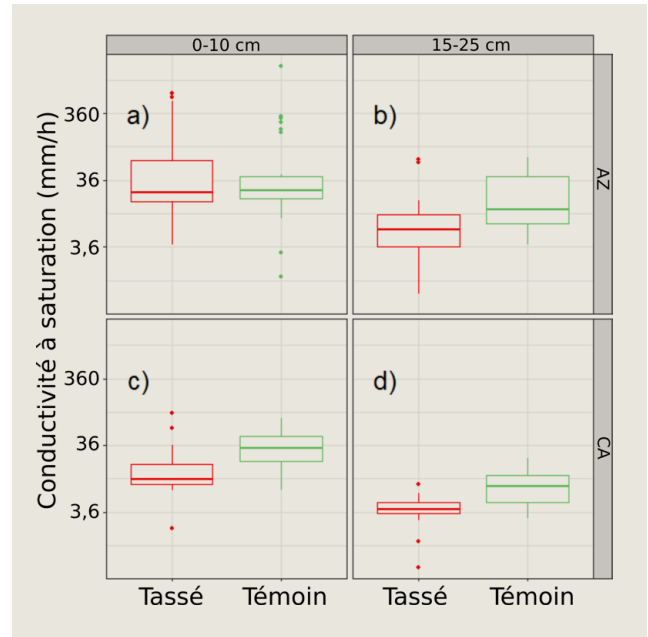
Les sites ont été lourdement instrumentés juste après la mise en place des traitements et de nombreux suivis sont réalisés depuis. Nous présentons ci-après les principaux résultats obtenus en lien avec les suivis des propriétés physiques et hydrodynamiques des sols, des nappes perchées, des solutions du sol et de la croissance des peuplements.

2 La dynamique de la nappe perchée temporaire est vite impactée par la circulation du porteur

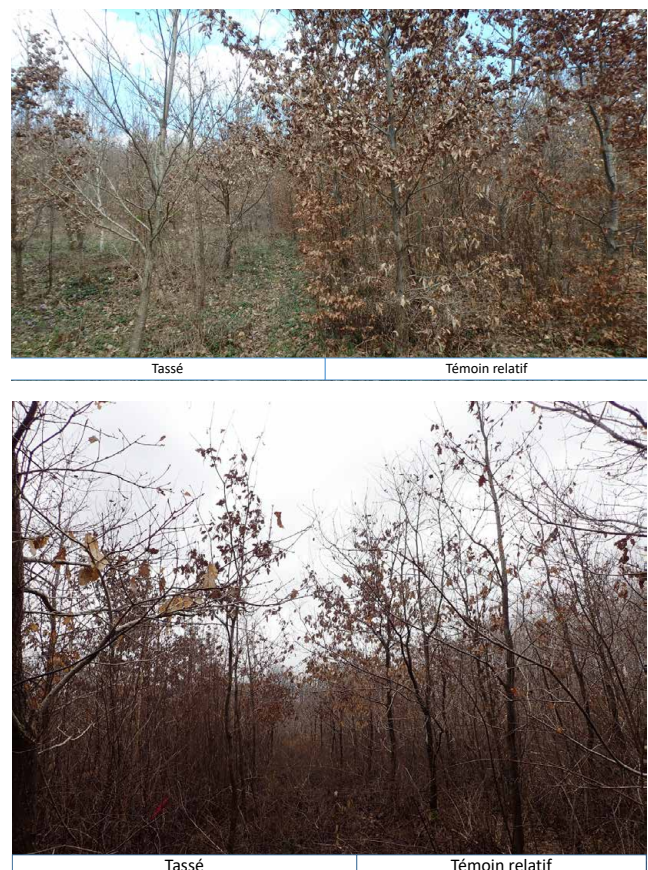
Dans les deux sites, la fréquence, la durée et le niveau d'apparition d'une nappe perchée ont augmenté très rapidement après les deux passages du porteur, par diminution de la vitesse d'infiltration verticale de l'eau dans le sol pour les deux sites. Cet engorgement de surface cause une asphyxie du sol une partie de l'année (Goutal Pousse *et al.*, 2014; Bonnaud *et al.*, 2019). L'évolution de l'intensité de l'engorgement temporaire sur les dix années suivant la circulation varie en fonction du site.

À AZ, la fréquence, la durée et le niveau d'apparition de la nappe perchée augmentent en 10 ans dans le traitement tassé alors qu'ils diminuent dans le traitement témoin, montrant une absence totale de restauration du sol tassé pour ce critère (Bonnaud *et al.*, 2019). Ces évolutions s'expliquent par l'absence d'amélioration des vitesses de transfert de l'eau dans le sol tassé (Fig. 1b) et par un développement de la strate arborée (chênes sessiles et recru ligneux) plus important dans le témoin que dans le traitement tassé pour ce site (Fig. 2).

À CA, la durée et le niveau d'apparition de la nappe augmentent dans le traitement témoin, en lien avec une augmentation de la pluviométrie hivernale (non observée à AZ), et diminuent dans le traitement tassé (Bonnaud *et al.*, 2019). Cette diminution de l'impact du tassement sur la dynamique de nappe pourrait s'expliquer par la composition du recru, dominé à CA par le bouleau qui colonise très rapidement le traitement tassé, contrairement au recru de hêtre et charme observé à AZ (Fig. 2). En effet, le bouleau tend à réduire l'intensité de l'engorgement (Czerepko *et al.*, 2018) et par ailleurs cette restauration ne vient pas d'une amélioration de la capacité d'infiltration de l'eau, laquelle reste 50 % plus faible au bout de 10 ans dans le traitement tassé que dans le témoin, et ce dès la surface (Fig. 1c et 1d).



↑ **Figure 1.** Conductivité hydraulique à saturation mesurée sur les sites tassement d'AZ et CA en 2021. Plus la conductivité est élevée, plus l'eau s'infiltrerait rapidement dans le sol.



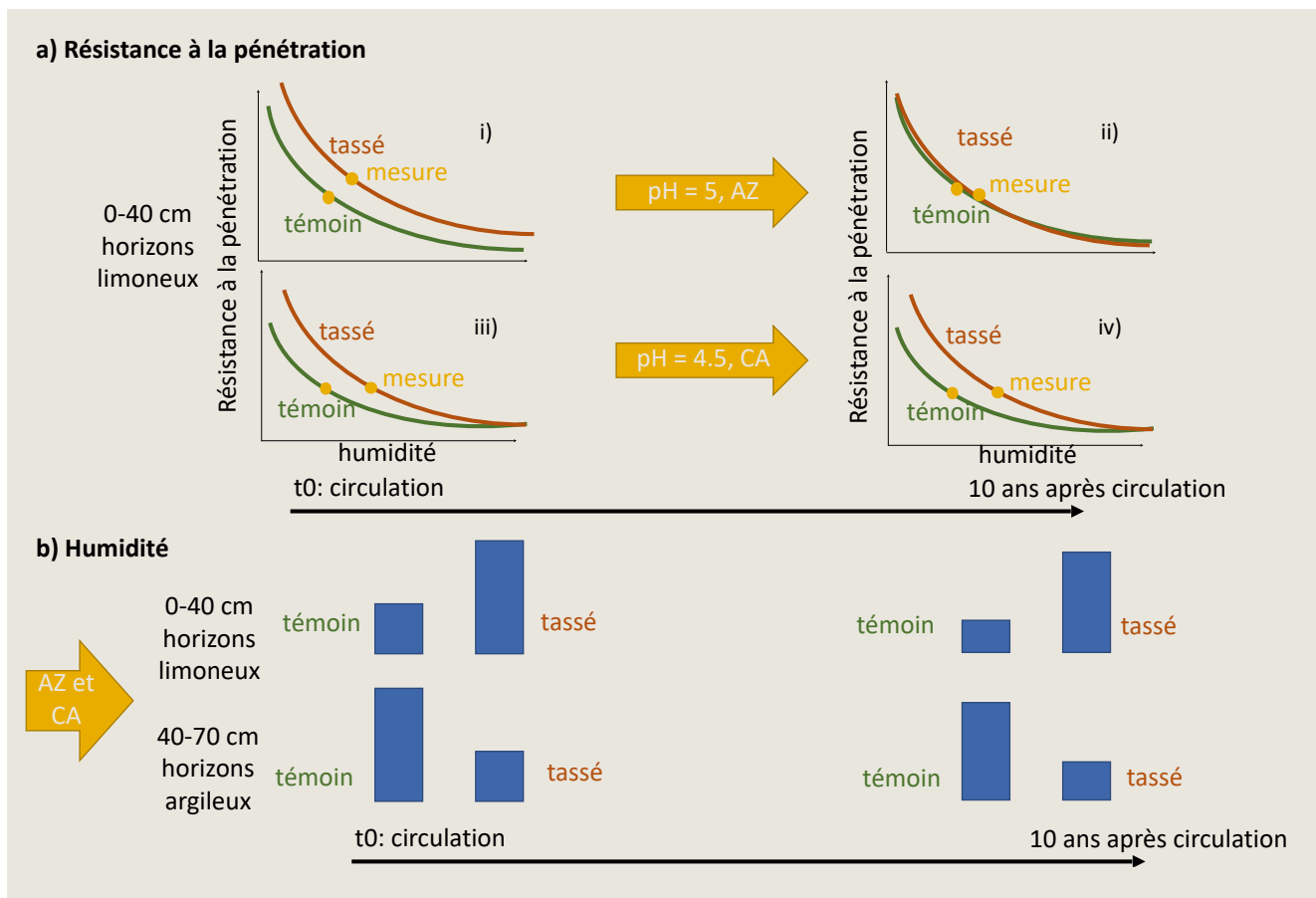
↑ **Figure 2.** Comparaison des peuplements entre le traitement tassé et la bande de témoin relatif encadrant les bandes tassées, AZ en mars 2019 en haut, CA en mars 2021 en bas.

3 La prospection du sol par les racines est diminuée par la circulation du porteur

À l'état sec, le tassement se traduit immédiatement par une augmentation forte de la résistance à la pénétration du sol, ce qui le rend très difficilement prospectable par les racines, tant à AZ (Fig. 3a_i) qu'à CA (Fig. 3a_iii). À l'état humide, l'augmentation de résistance est visible et importante à AZ (Fig. 3a_ii), alors qu'à CA la résistance n'est plus différente entre les traitements (Pousse et al., 2022a). Cependant, le sol tassé étant asphyxié sur les deux sites (paragraphe précédent, Goutal Pousse et al., 2014; Bonnaud et al., 2019), les racines peuvent difficilement le prospector, même si la résistance à la pénétration est faible à CA.

Dix ans après tassement, à humidité équivalente, les valeurs de résistance à la pénétration du traitement tassé sont revenues au niveau de celles du témoin pour AZ (Fig. 3a_ii). Cette évolution positive de la résistance à la pénétration doit cependant être modulée car, au cours de l'année, la dynamique de l'eau reste impactée (Fig. 3b). L'humidité de surface restant supérieure dans le tassé par rapport au témoin quasiment toute l'année, la résistance à la pénétration y est inférieure et c'est l'inverse en profondeur (Fig. 3b et 3a_ii).

À CA, aucune évolution positive de la résistance à la pénétration n'est observée en 10 ans dans le traitement tassé (Fig. 3a_iv).



↑ **Figure 3.** Schéma récapitulatif des effets du tassement sur l'humidité et la résistance à la pénétration des sols au cours des 10 premières années. La résistance à la pénétration du sol diminue de manière exponentielle quand l'humidité augmente. À humidité équivalente la circulation du porteur augmente la résistance à la pénétration. Dix ans après, la dynamique de l'humidité est toujours perturbée par le passage du porteur sur les deux sites. La relation entre résistance à la pénétration et humidité est proche de celle du témoin pour AZ, alors qu'à CA aucune évolution n'a été constatée.

4 Le tassement modifie la composition des solutions de sols

La stabilité des agrégats est un facteur important de la rétention en éléments nutritifs (Bedel *et al.*, 2018). Aussi perturber la structure du sol par la circulation d'engins peut modifier la biogéochimie du sol et la composition des solutions de sols, c'est-à-dire de l'eau chargée d'ions qui circule dans la porosité des sols. Ces solutions sont des indicateurs pertinents du fonctionnement actuel du sol et de l'évolution de la fertilité chimique.

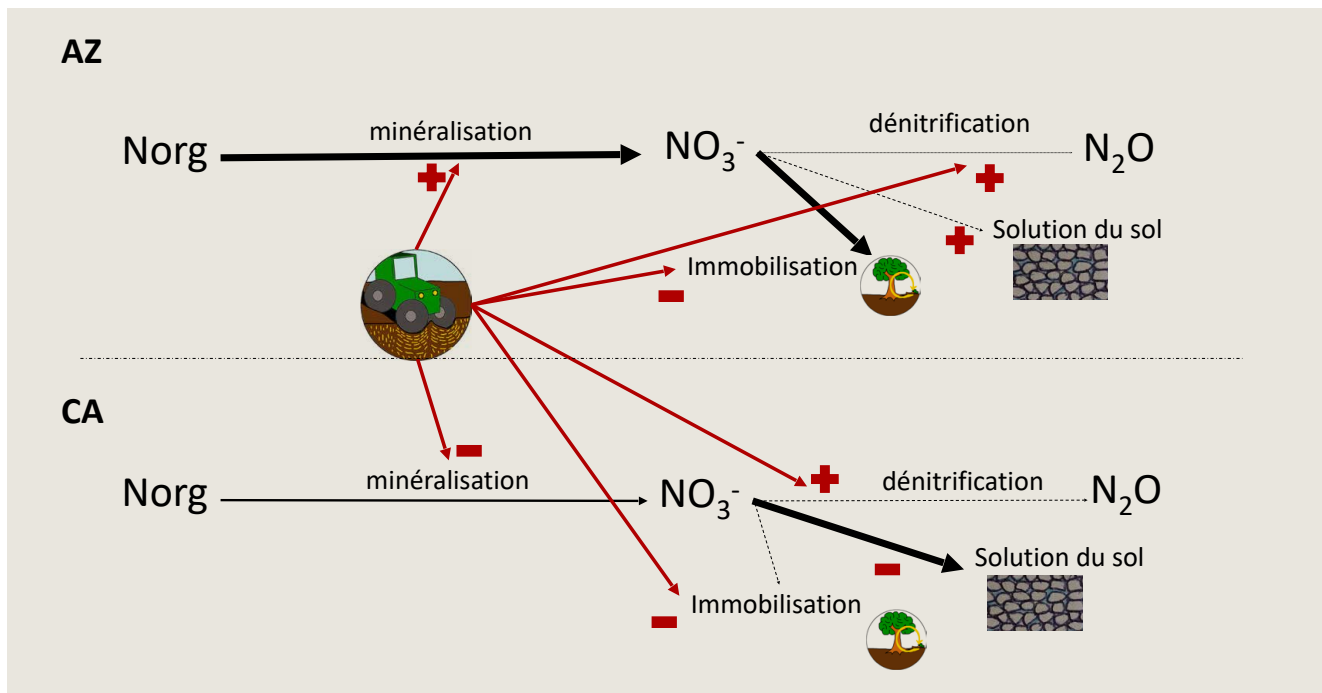
La composition des solutions du sol a été suivie pendant 10 ans et montre des impacts et des dynamiques d'évolution différents entre les deux sites (Ranger *et al.*, 2021). Dans les deux sites, la perturbation par tassement diminue l'immobilisation des nitrates, c'est-à-dire leur absorption par les arbres et l'immobilisation microbienne (Fig. 4), et elle augmente la dénitrification à cause de l'engorgement temporaire plus marqué. Toutefois, l'immobilisation des nitrates est plus forte à AZ qu'à CA en lien probable avec la richesse du sol. La perturbation diminue la production (minéralisation de l'azote organique) à CA alors qu'elle l'augmente légèrement à AZ, cette divergence n'est pas

encore élucidée. Cela conduit à un bilan opposé : alors que la concentration en nitrates est diminuée par le tassement à CA, elle est augmentée à AZ.

À son tour, cette dynamique des nitrates influence la dynamique des cations (Ca^{2+} , Mg^{2+} , K^+ notamment) ; la solution du sol étant électriquement neutre, la production d'anions (comme le nitrate) est équilibrée par la mise en solution de cations. Le nitrate étant un anion très mobile (car très soluble dans l'eau et peu retenu sur la phase solide du sol), il peut être lixivié hors du profil de sol, induisant possible-ment une perte d'éléments nutritifs pour le sol.

Au cours du temps l'impact du tassement sur la composition des solutions du sol diminue pour les deux sites, mais plus rapidement pour CA que pour AZ (Ranger *et al.*, 2021), en lien probable avec la diminution de l'engorgement temporaire (augmentant la dénitrification) dans le traitement tassé à CA (cf. §2). Ces changements notables et durables de la chimie des eaux de sols après tassement ont pu impacter la nutrition des peuplements.

Seul un suivi à plus long terme permettra de constater si ces évolutions positives sont suffisantes pour compenser les perturbations initiales du cycle des éléments nutritifs.



↑ **Figure 4.** Schéma récapitulatif de la dynamique de l'azote sur les deux sites de suivi à long terme des effets du tassement. La minéralisation de l'azote organique (Norg) en nitrate (NO_3^-) et protoxyde d'azote (N_2O) sur les deux sites est impactée par les deux passages du porteur (flèches et signes rouges).

5 Le tassement affecte durablement les peuplements et leur productivité

La perturbation par tassement a augmenté le taux de mortalité des chênes sessiles plantés à AZ (25% contre 7% dans le témoin) mais pas à CA, en lien avec la météo de la première saison de végétation : printemps humide pour AZ et normalement sec pour CA (Goutal Pousse et al., 2014). La contrainte d'engorgement temporaire en début de saison de végétation, qui est normalement plus forte dans le traitement tassé que dans le traitement témoin pour les deux sites, a été moins observée à CA qu'à AZ lors de l'installation des plants (printemps 2008 à AZ et printemps 2009 à CA). Les dispositifs ont été regarnis en plants, une fois pour CA et deux fois pour AZ. Le tassement a multiplié par deux le taux de mortalité à AZ quand on considère l'ensemble des arbres morts après les deux regarnis (60% dans le tassé contre 30% dans le témoin), alors qu'il n'y a pas eu de différence entre traitements à CA.

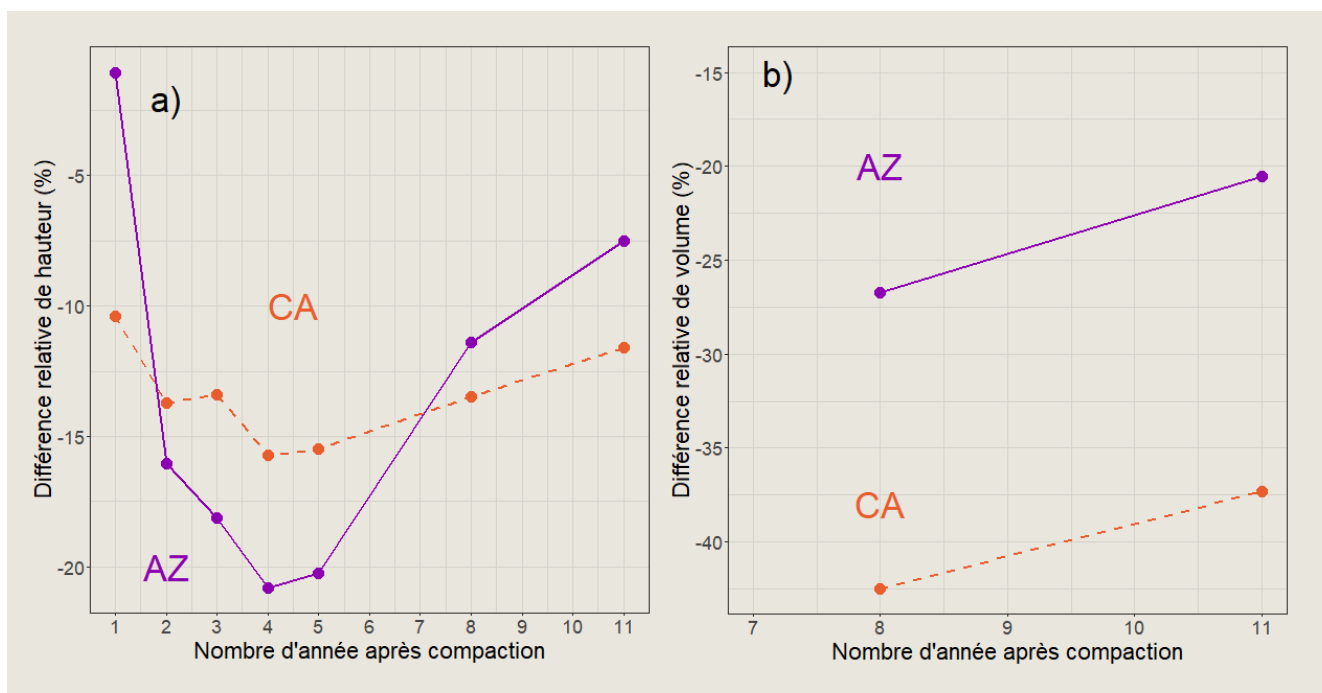
La comparaison de l'effet immédiat du tassement sur le taux de reprise de la plantation entre les deux sites montre qu'il peut être très différent selon qu'il est suivi d'un printemps sec ou humide. Le deuxième épisode de mortalité à AZ peut également s'expliquer par l'absence colonisation de la zone tassée par un recru ligneux ayant un effet sur la dynamique de la nappe perchée temporaire, notamment au printemps et en début d'été (cf. §2).

Dans tous les cas, le tassement a limité la hauteur des chênes dès les premières années (Fig. 5a). Cet effet est très variable d'une année à l'autre à AZ : proche de 0% d'écart en hauteur la première année, il atteint 20% d'écart 4 et 5

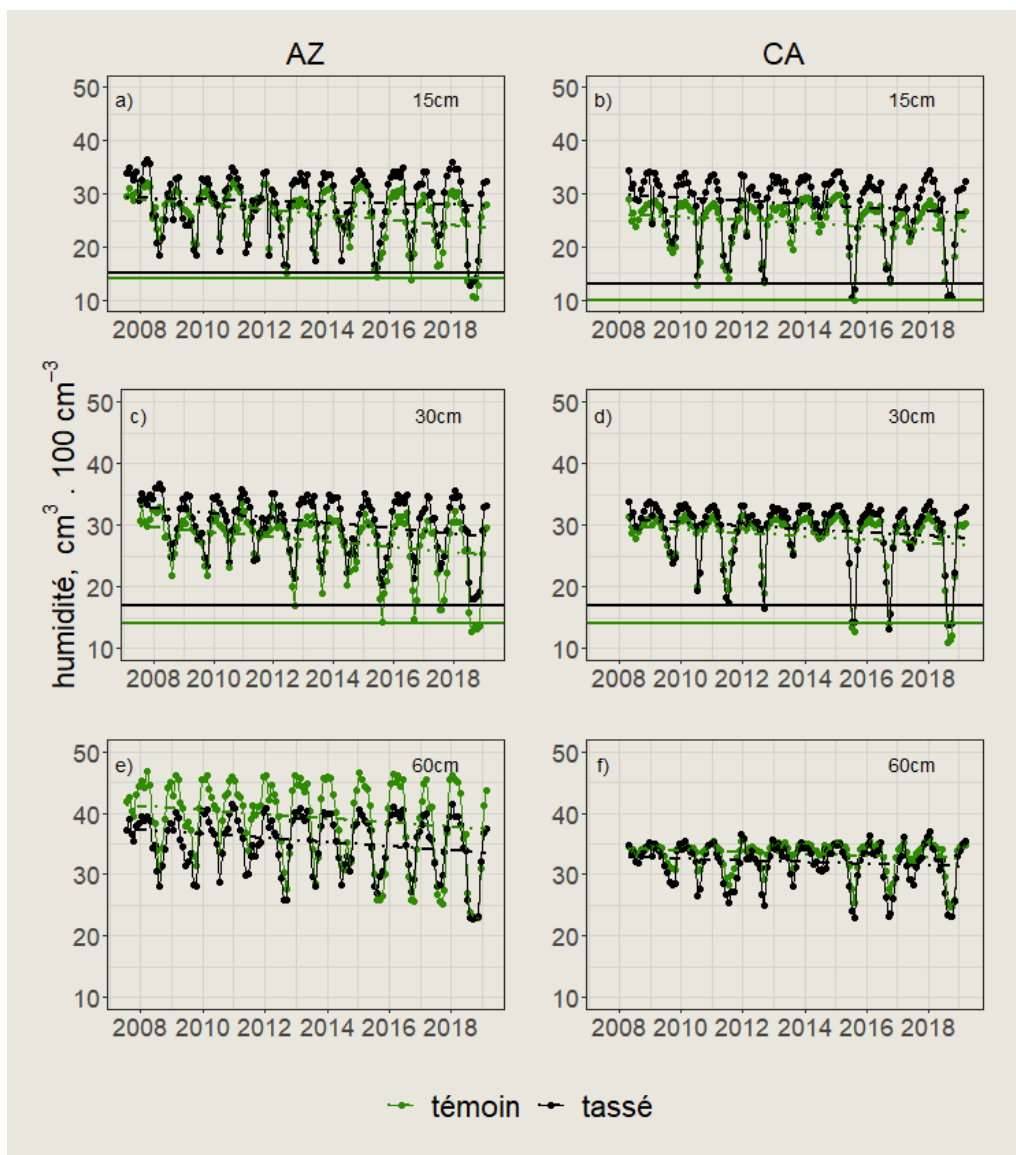
ans après tassement, pour n'être plus que de 8 % environ au bout de 11 ans. Sur CA, l'effet est plus fort dès la première année (10% d'écart) et se maintient autour de 10-15% sur les 10 années suivantes. La croissance radiale est aussi durablement affectée par le tassement sur les deux sites d'études : en effet, les circonférences mesurées 8 ans et 11 ans après tassement sont significativement plus faibles sur les traitements tassés des deux sites, avec un écart de 10 et 20% pour AZ, et d'environ 20 % pour CA.

Un calcul de volume a été réalisé 8 ans et 11 ans après tassement grâce aux tarifs de cubage issus du projet ANR Emerge (Deleuze et al., 2014). Au bout de huit ans la perte de volume dans le traitement tassé par rapport au témoin est de 27% à AZ et 42% à CA, et au bout de onze ans elle est de 21% à AZ et 37% à CA (Fig. 5b).

À AZ, l'humidité du sol dans le traitement témoin est descendue jusqu'au point de flétrissement permanent à 15 et 30 cm de profondeur lors des étés 2015, 2016 et 2018 (Fig. 6a et c). Dans le traitement tassé, ce point n'est atteint qu'à 15 cm de profondeur pour les mêmes années en lien probable avec (1) la moindre infiltration de l'eau en profondeur (Fig. 2), et (2) une productivité moindre (-20 % sur le volume) conduisant à une demande en eau plus faible des peuplements. Cet état de sécheresse des horizons limoneux plus important dans le traitement témoin pourrait en partie expliquer la diminution d'écart de hauteur entre le traitement tassé et le témoin pour les mesures 8 et 11 ans après tassement (Fig. 5a). Mais cet effet s'inversera probablement à plus long terme : étant donné que les racines et l'eau ne descendent pas en profondeur dans le traitement tassé, le réservoir en eau exploré y est donc beaucoup plus faible que dans le témoin, aggravant les effets délétères des sécheresses.



↑ **Figure 5.** Modification de la hauteur (a) et du volume (b) des peuplements de chênes sessiles dans le traitement tassé par rapport au traitement témoin en fonction du nombre d'année après tassement



← **Figure 6.** Évolution de l'humidité au cours du temps en fonction du traitement et de la profondeur. Les lignes en pointillé correspondent aux modèles d'évolution de l'humidité des sols par traitement et profondeur, les lignes horizontales en trait plein correspondent aux valeurs d'humidité au point de flétrissement permanent (en dessous de cette ligne l'eau n'est plus disponible pour la végétation).

À CA, l'humidité du sol dans le traitement tassé est descendue jusqu'au point de flétrissement permanent à 15 cm de profondeur lors des étés 2010, 2011, 2012, 2015, 2016 et 2018 (Fig. 6b) alors que, dans le traitement témoin, ça n'a été le cas que pour les étés 2015 et 2018. À 30cm de profondeur, le déficit hydrique est également plus fréquent dans le tassé que dans le témoin, en lien probable avec (1) une croissance racinaire limitée aux couches de surface (Goutal Pousse et al., 2014; Pousse et al., 2022b) et (2) un développement fort du recru de bouleau (cf. §2). Le déficit hydrique explique certainement un écart de volume entre le tassé et le témoin plus fort à CA qu'à AZ.

Quelques nids de chenilles processionnaires ont pu être observés à AZ onze ans après mise en place, mais seulement dans les traitements ayant subi un tassement (suivi ou pas de travail du sol en plein ou par potets). Dans ces traitements, la croissance des chênes avec peu de concurrence ligneuse et/ou les stress physiologiques induits par le

tassement (enracinement plus superficiel, asphyxie hivernale, résistance à la pénétration élevée en été, nutrition perturbée) les rendent peut-être plus détectables et sensibles que dans le traitement témoin.

Enfin, le recru ligneux observé à CA (bouleau en majorité) est autant présent dans le traitement tassé que dans le traitement témoin. Au contraire, à AZ, le recru (hêtre et charme en majorité) est quasiment absent du traitement tassé (Fig. 2). Les chênes du traitement tassé à AZ bénéficient donc moins de gainage et d'élagage naturel et sont ainsi plus fourchus, avec des branches basses encore bien présentes (Fig. 2). Ce qui devrait avoir des incidences sur les perspectives de commercialisation future, avec une moindre valorisation des bois du traitement tassé.

6 Restauration : les cycles d'humectation-dessiccation et gel-dégel ont peu d'effet

Dans les 15 premiers cm, les cycles de gel-dégel et d'humectation-dessiccation ont permis de restructurer partiellement le sol dès les premières années après tassement, créant une porosité horizontale (Goutal Pousse *et al.*, 2014; Bottinelli *et al.*, 2014b). Les températures inférieures à 0°C qui étaient observées à 10 cm en 2008 et 2009 n'ont plus été observées depuis.

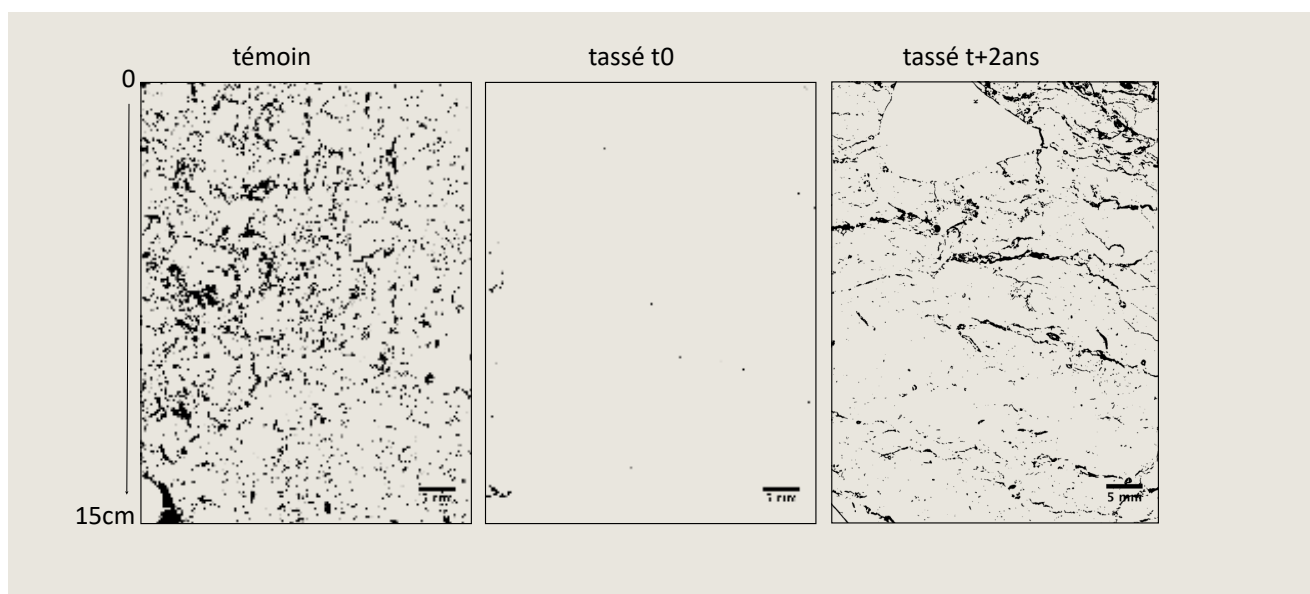
Dix ans après tassement, l'humidité mesurée dans le sol du traitement tassé, comparée à celle du témoin, reste supérieure en surface (15cm et 30cm : Figures 6a à 6d) et inférieure en profondeur (60 cm : Figures 6e et 6f). Cela témoigne d'une stagnation de l'eau en surface dans le sol tassé, eau qui n'arrive pas à percoler en profondeur. En 10 ans, l'écart d'humidité entre tassé et témoin (Figure 6, lignes pointillées) reste stable dans les deux sites aux différentes profondeurs de mesure, sauf pour la couche la plus superficielle d'AZ (-15 cm) où il augmente légèrement. La restructuration du sol par ces mécanismes naturels semble donc faible au regard de la dégradation initiale, ceux-ci n'ayant pas permis le retour à une structure favorable à l'infiltration verticale de l'eau dans le sol tassé au bout de 10 ans.

7 Les vers de terre, acteurs majeurs de la structuration des sols, peinent à survivre dans les traitements tassés

La circulation du porteur a eu un effet négatif rapide sur les populations de vers de terre des deux sites. Les deux sites diffèrent en termes d'acidité : pH légèrement infé-

rieur (CA) ou supérieur (AZ) à 4.5. Cette différence a une influence sur les populations de vers de terre initialement présentes : vers épigés seulement à CA; vers épigés, endogés et anéciques à AZ. Pour rappel, les vers épigés restent dans les litières, les endogés restent en profondeur dans le sol minéral et les anéciques colonisent l'ensemble du sol. Les populations de vers épigés sont revenues en quelques années dans le traitement tassé (à CA et AZ) mais à AZ les populations de vers endogés et anéciques n'ont pas recolonisé le sol tassé (Bottinelli *et al.*, 2014a). Cela a des conséquences sur les propriétés physiques des sols : les structures créées par les phénomènes physiques (i.e. gel-dégel, humectation-dessiccation) restent majoritairement orientées horizontalement, elles sont moins interconnectées que celles créées par les vers de terre anéciques (Fig. 7, Bottinelli *et al.*, 2014b), ce qui limite la circulation des gaz et de l'eau dans le sol tassé. On voit que l'évolution est engagée en surface mais le fonctionnement du sol et du peuplement est loin d'être revenu à l'état initial.

Les vers de terre anéciques comme *Lumbricus terrestris*, sont très sensibles à une augmentation de compacité du sol (Ducasse *et al.*, 2021). Quand ils sont apportés sur un cloisonnement leur participation à la restructuration du sol n'est pas observable alors qu'elle l'est dans les zones non perturbées (Ampoorter *et al.*, 2011). Dix ans après tassement, il a été testé de les faire prospérer à CA dans le traitement tassé, en les retenant dans un volume de sol emprisonné par un tube PVC pour pouvoir retrouver les survivants. Le taux de survie au bout de 6 mois est supérieur à 50%, ce qui est une bonne surprise pour un sol aussi acide. L'activité fouisseuse des vers est diminuée par le tassement mais reste cependant significative (Ducasse *et al.*, 2021). Cependant, la technique d'introduction de vers de terre anécique n'étant pas généralisable sur l'ensemble des surfaces tassées, le potentiel de régénération des sols acides et tassés par ces vers de terre semble limité.



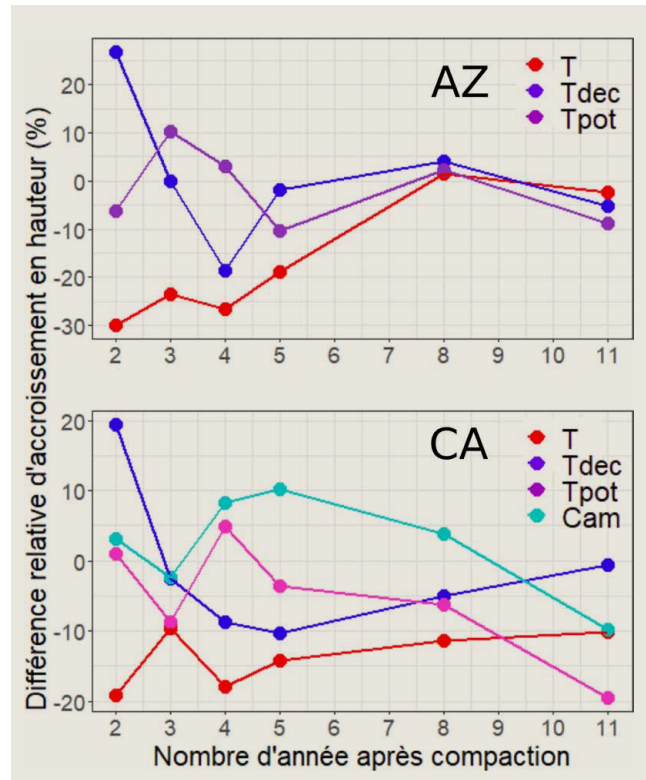
↑ **Figure 7.** Analyse de lames minces de sol faisant ressortir la porosité en noir et les particules solides en blanc, AZ juste après tassement (tassé t0) et 2 ans après.

8 Quelle technique de remédiation pour accélérer le retour à un fonctionnement non perturbé du sol ?

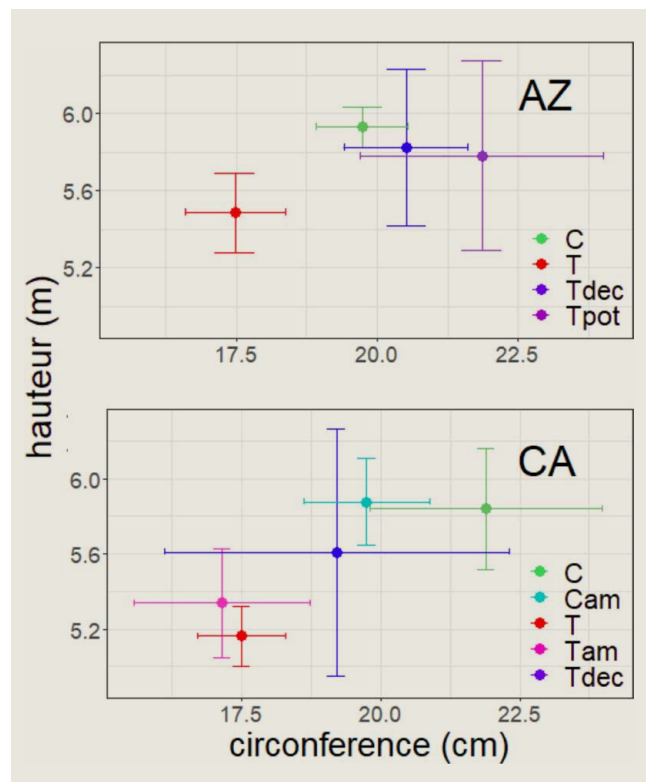
Les deux techniques de remédiation mécanique étudiées sur ces sites donnent des résultats très variables sur la vitalité des plants, en fonction de l'année et du site (Fig. 8). Les hauteurs et les circonférences au sein des traitements tassés et décompactés mécaniquement sont même plus variables entre arbres pour une même année et un même site qu'entre les traitements témoin et tassé (Fig. 9).

Le semi-labour en plein au cover crop a un effet opposé entre les deux sites sur le volume des chênes : à AZ, le volume est supérieur à celui constaté sur le témoin, de 8% et 12% au bout de huit et onze ans respectivement, tandis qu'à CA il est inférieur de 10% et 15%.

À AZ, le travail localisé en potets après tassement augmente de 29% et 23% le volume des chênes par rapport au témoin 8 et 11 ans respectivement après mise en place, surtout via l'augmentation de la circonférence (Fig. 9). L'accroissement en hauteur dans ce traitement était, dans les premières années, plus élevé que dans le témoin. Mais, après 11 ans, il est devenu moins élevé que dans le témoin et même le traitement tassé (Fig. 8), probablement parce que les racines des chênes n'arrivent pas à prospector à l'extérieur du potet ameubli. Deux ans après mise en place, le semi-labour au cover crop donnait une meilleure croissance en hauteur que le travail par potets. La tendance s'est inversée les deux années suivantes avant de revenir à un effet plus favorable du semi-labour par rapport au potet travaillé, alors que le travail du cover crop est plus superficiel que le travail par potet. Il est possible que le travail par potet rajoute une contrainte d'engorgement : l'eau qui stagne en surface à cause du tassement est drainée vers le potet et s'y infiltre facilement (car il est ameubli) sans toutefois permettre une percolation profonde de l'eau. Le potet pourrait ainsi créer un engorgement défavorable au plant (effet « baignoire »). On observe également que les deux techniques de travail du sol ne permettent pas au recru naturel de recoloniser le sol après tassement et que les chênes sur ces traitements poussent avec peu de concurrence. Cela donne un rapport hauteur sur circonférence plus faible (Fig. 9) et des chênes moins élagués (Fig. 10) que dans le témoin. Cela se ressentira probablement lors la commercialisation des bois.



↑ Figure 8. Modification de l'accroissement en hauteur par rapport au témoin pour les différents traitements testés : T = tassé, Tdec = tassé et décompacté par cover crop, Tpot = tassé et décompacté par potet au profit du plant, Tam= tassé et amendé, Cam= témoin amendé.

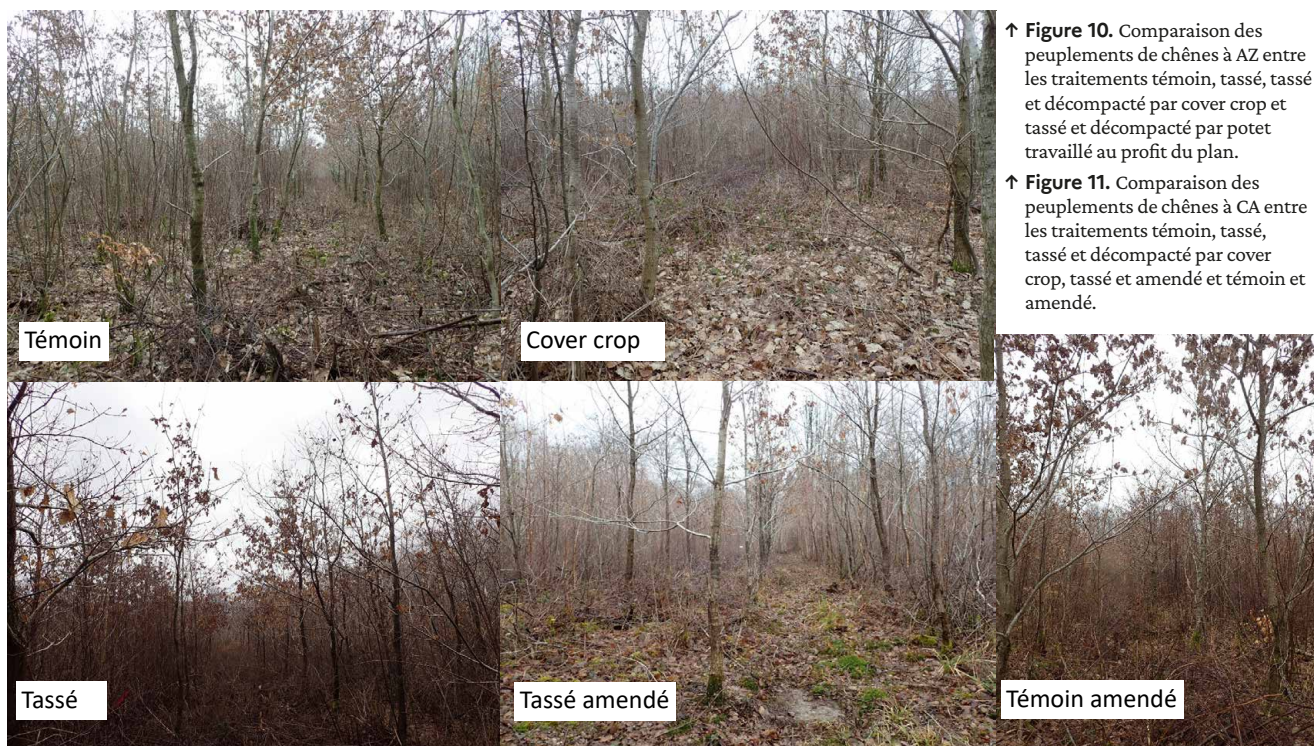


↑ Figure 9. Relation entre la hauteur et la circonférence pour les différents traitements testés 11 ans après mise en place : T = tassé, Tdec = tassé et décompacté par cover crop, Tpot = tassé et décompacté par potet au profit du plant, Tam= tassé et amendé, Cam= témoin amendé, C = témoin.



↑ **Figure 10.** Comparaison des peuplements de chênes à AZ entre les traitements témoin, tassé, tassé et décompacté par cover crop et tassé et décompacté par potet travaillé au profit du plan.

↑ **Figure 11.** Comparaison des peuplements de chênes à CA entre les traitements témoin, tassé, tassé et décompacté par cover crop, tassé et amendé et témoin et amendé.



À CA, l'amendement sur le sol non perturbé a un effet positif sur la croissance en hauteur par rapport au témoin : effet très fort les premières années (Fig. 8), mais qui devient faible (bien que toujours positif) au bout de 11 ans (Fig. 9). L'apport d'amendement après tassement a limité la perte de volume des chênes à 26% et 35% (contre 42% et 37% pour le tassement seul) par rapport au témoin au bout de 8 et 11 ans. Et l'effet sur la circonférence est nul voire légèrement négatif au bout de 11 ans par rapport au tassement seul. (Fig. 9). L'effet positif de l'amendement sur la croissance des chênes est ainsi plus faible que celui du tra-

vail par cover crop. Pourtant, l'effet de l'amendement a conduit en 10 ans à la restauration de la résistance à la pénétration du sol (Pousse et al., 2022a), probablement de manière directe grâce à l'apport d'ions flocculants et indirecte par une amélioration biologique (de la végétation aux micro-organismes). Il est probable que l'amélioration physique du sol par amendement ait conduit à une plus forte croissance du recru et des chênes (Fig. 8 et 11) conduisant à une consommation accrue d'eau et donc à une croissance plus limitée lors des dernières sécheresses.

Conclusion

Les effets de deux passages d'un porteur de 20 t sont toujours très visibles sur les deux sites 10 ans après, même si des dynamiques d'évolution naturelle sont engagées. Bien que les deux sites soient relativement proches en termes de contextes pédologique et climatique, leurs dynamiques d'évolution sont contrastées et varient selon le critère observé, indiquant des différences de processus de régénération des sols tassés :

- À AZ le sol est un peu plus riche chimiquement. L'activité des vers de terre anéciques y est plus forte, le potentiel de restructuration du sol y est donc plus important. Au cours du temps, la résistance à la pénétration diminue et la vitesse d'infiltration de l'eau en surface augmente. Par conséquent, avec le temps, la restructuration du traitement tassé permettra peut-être d'augmenter la vitesse d'infiltration de l'eau en profondeur, diminuant ainsi la contrainte d'engorgement due à une nappe perchée temporaire et améliorant la croissance des peuplements, ce qui n'est pas encore le cas.
- À CA le sol est un peu moins riche chimiquement et il a une structure moins développée et moins stable. L'activité des vers de terre (épigés) ne se produit qu'en surface. En conséquence, la restructuration se fait principalement par gel-dégel et humectation-dessiccation, ce qui ne permet pas un retour à une structure stable et favorable à la prospection racinaire (effet toujours visible sur la résistance à la pénétration et la vitesse d'infiltration de l'eau dès la surface et jusqu'à 70 cm de profondeur). Par contre, la colonisation des sols tassés par le bouleau permet assez rapidement de diminuer l'engorgement du sol (la nappe perchée temporaire créée par tassement persiste moins longtemps). Cette dynamique végétale pourrait éventuellement contribuer à restructurer le sol (galeries de racines, exsudats racinaires...) mais plus lentement que s'il y avait une action de vers de terre anéciques.

Les techniques de remédiation testées (amendement, décompactage en plein au cover crop et décompactage par potet) sont partiellement efficaces. À court terme, le travail du sol par cover crop permet de limiter la mortalité et la perte de croissance occasionnées par le tassement, mais pas de manière systématique (un site sur les deux seulement). Le travail du sol par potet travaillé, testé seulement sur un site a également permis de limiter les effets du tassement sur les chênes. Cependant, les deux techniques de travail du sol testées ne permettent pas de corriger les effets du tassement sur la dynamique du recru naturel et donc ses effets sur la forme des chênes. L'amendement a favorisé l'installation des chênes dans le traitement tassé et a diminué l'impact du tassement sur les solutions du sol. Les effets bénéfiques du travail du sol et de l'amendement sur la croissance des chênes semblent s'atténuer au bout d'une dizaine d'années. L'amendement calco-magnésien, testé sur le site acide, permet néanmoins d'augmenter la vitesse de régénération de la structure du sol tassé.

Au final, les conséquences d'un tassement, même modéré comme dans les expériences présentées, ont un impact fort à moyen terme sur les sols et leur fonction ainsi que sur les arbres. Vu la difficulté à remédier à ces effets délétères, il est plus pertinent de limiter le tassement des sols.

Noémie Pousse¹, Arnaud Legout², Frédéric Darboux³,
Jacques Ranger²

1. ONF, DT Auvergne-Rhône-Alpes, pôle RDI Chambéry

2. INRAE Champenoux UR 1138 Biogéochimie des Écosystèmes Forestiers

3. Université de Lorraine – INRAE UMR LSE Nancy

RÉFÉRENCES

- Ampoorter E., De Schrijver A., De Frenne P., Hermy M., Verheyen K., 2011. Experimental assessment of ecological restoration options for compacted forest soils. *Ecological Engineering*, vol. 37, pp. 1734–1746
- Bedel L., Legout A., Poszwa A., van der Heijden G., Court M., Goutal-Pousse N., Montarges-Pelletier E., Ranger J., 2018. Soil aggregation may be a relevant indicator of nutrient cation availability. *Annals of Forest Science*, 75.
- 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*, vol. 437, pp. 380–395
- Bottinelli N., Capowiez Y., Ranger J., 2014a. Slow recovery of earthworm populations after heavy traffic in two forest soils in northern France. *Applied Soil Ecology*, vol. 73, pp. 130–133.
- Bottinelli N., Hallaire V., Goutal N., Bonnaud P., Ranger J., 2014b. Impact of heavy traffic on soil macroporosity of two silty forest soils: Initial effect and short-term recovery. *Geoderma*, vol. 217–218, pp. 10–17
- Czerepko J., Boczoń A., Wróbel M., Gawryś R., Sokołowski K., 2018. Removal of birch as a means of protecting raised bog mossy vegetation *Ledo-Sphagnetum magellanicum*. *Wetlands Ecology and Management*, vol. 26, pp. 689–702
- Deleuze C., Morneau F., Renaud J.P., Rivoire M., Santenoise P., Longuetaud F., Mothe F., Herve J.C., Vallet P., Vivien Y., 2014. Estimer le volume total d'un arbre, quelles que soient l'essence, la taille, la sylviculture, la station. *Rendez-Vous Techniques*, n° 44, pp. 22–32
- Ducasse V., Darboux F., Auclerc A., Legout A., Ranger J., Capowiez Y., 2021. Can *Lumbricus terrestris* be released in forest soils degraded by compaction? Preliminary results from laboratory and field experiments. *Applied Soil Ecology*, vol. 168, 104131.
- Goutal Pousse, N., Bock, J. & Ranger, J., 2014. Impacts de la circulation d'un porteur forestier sur deux sols sensibles au tassement et dynamique de restauration naturelle. *Rendez-Vous Techniques*, 43, 33–39.
- Pousse N., Bonnaud P., Legout A., Darboux F., Ranger J., 2022a. Forest soil penetration resistance following heavy traffic: A 10-year field study. *Soil Use and Management*, vol. 38, pp. 815–835
- Pousse N., Marcet O., Blas-Larrosa J., Schneider S., 2022b. Les cloisonnements sylvicoles sur sols à engorgement temporaire : à quel degré de perturbation des sols et des peuplements s'attendre ? *Rendez-Vous Techniques*, n° 73, pp. 16–21
- Ranger J., Bonnaud P., Santenoise P., Zeller B., Nourrisson G., Pelletier M., Gelhaye D., Legout A., 2021. Effect of limited compaction on soil solution chemistry in two acidic forest ecosystems: Changes, recovery and impact of liming. *Forest Ecology and Management*, vol. 499, 119538.

