

➤ IFOSSA

➤ Distribution des réseaux d'interactions et des fonctions dans un système spatialement hétérogène, cas de l'agroforesterie

Métaprogramme BIOSEFAIR

Bilan de projet : 2021 - 2024

Mars 2025

L'agroforesterie définie au sens large par la présence d'arbres dans les paysages agricoles, est un exemple de cultures mixtes qui augmentent la « biodiversité planifiée ». Ces arbres de par leurs structures pérennes permettent la mise en place d'un microclimat qui varie dans le temps, entraînant une modification de la biodiversité associée et l'activité des organismes par diversification des habitats. Cependant, peu de travaux se sont intéressés aux effets de l'agroforesterie sur les organismes du sol et sur les fonctions qu'ils remplissent.

L'objectif général de ce projet est de mettre en évidence la réponse de réseaux d'interactions écologiques et des fonctions à l'organisation spatiale du milieu après l'implantation d'arbres et de bandes enherbées dans des grandes cultures. L'hypothèse principale du projet est que la modification de l'organisation spatiale des parcelles par l'implantation d'arbres aboutit à une augmentation de la diversité et de la multifonctionnalité des parcelles agricoles. Les objectifs opérationnels sont de (A) caractériser les modifications de biodiversité au sein des taxons et par groupe trophique, (B) inférer les réseaux d'interactions entre les organismes étudiés, (C) établir les relations entre les réseaux d'interactions écologiques, le fonctionnement physicochimique des sols et la croissance des plantes pour comprendre la multifonctionnalité de ces parcelles.

Cette étude est réalisée sur le Dispositif Instrumenté en Agroforesterie Méditerranéenne sous contrainte hydrique (DIAMs) au sud de Montpellier sur une station expérimentale INRAE (UE

Diascope, Mauguio). Il s'agit d'un dispositif expérimental factoriel de 5 ha, en trois blocs. Dans chaque bloc, 3 modalités sont comparées : des placettes de plantations forestières, un système agroforestier et des placettes en grande culture. Au sein du système agroforestier, nous dissocions plusieurs habitats : (i) le linéaire d'arbres et la bande enherbée à leur pied et (ii) l'allée cultivée. Les cultures sont menées en agriculture conventionnelle, à bas niveau d'intrants. Le site instrumenté permet le suivi du rayonnement arrivant au sol, de la température et humidité du sol à différentes profondeurs, de la croissance racinaire et des teneurs en nutriments de la solution du sol.

La croissance et les rendements des cultures, la croissance et les stratégies d'allocation des ressources des robiniers ont été suivis. L'identification morphologique ou moléculaire a permis de caractériser les communautés d'ingénieurs du sol, de macro-arthropodes de surface, de nématodes libres et parasites (phytophages et entomopathogènes), de champignons et de bactéries (libres dans le sol et associés aux nématodes parasites), d'adventices, d'invertébrés aériens phytophages, prédateurs et parasites.

Les réseaux d'interactions ont été reconstruits à l'aide des observations de terrain soit directement comme les interactions bipartites soit inférées en combinant les données de cooccurrence des taxons avec un graphe de connaissances sur les interactions trophiques dans les sols (via des bases de données). L'intensité de la réponse des différents groupes taxonomiques et trophiques est analysée en comparant les valeurs obtenues à celles obtenues dans le témoin agricole et dans le témoin forestier. La réponse de la structure/composition des modules reconstruits est testée face à l'organisation spatiale des placettes agroforestières.

Dispositif expérimental

Le dispositif se trouve sur l'unité expérimentale de Diascope à Mauguio (34). Il correspond à une expérimentation factorielle en trois blocs, composés chacun de trois modalités : placettes conduites en agroforesterie, en culture monospécifique annuelle (témoin agricole) et en plantation forestière (témoin forestier). Au sein de la modalité agroforestière, les rangées d'arbres sont espacées de 17 mètres, entre chacune d'elles sont cultivées les cultures monospécifiques annuelles. Les arbres ont été implantés sur des bandes enherbées sur lesquelles a été semé, en 2019. La composition floristique du linéaire sous arboré a ensuite évolué librement. Les bandes enherbées, aussi appelées LSA (linéaire sous arboré), mesurent 2 mètres de large ; les arbres sont espacés de cette même distance au sein de la bande. Dans la modalité forestière, les arbres ont été implantés de manière plus dense, les rangées étant séparées de 3 mètres et les arbres de 2 mètres au sein d'une rangée. Les placettes de cette modalité ont une surface de 750 à 1 100 m² selon les blocs. Les placettes de la modalité agricole mesurent 1 200 à 1 600 m². Les placettes cultivées sont conduites à bas niveau d'intrants et le travail du sol est peu profond. Le dispositif total mesure environ 5 hectares et a été mis en place en 2017.

L'espèce ligneuse choisie lors de la mise en place du dispositif est le Robinier (*Robinia pseudoacacia*) pour les modalités agroforestières et forestières. C'est un arbre de la famille des Fabacées. Il a été choisi pour ses caractéristiques : feuillage caduque limitant la compétition pour la lumière en hiver, système racinaire pivotant lui permettant d'accéder aux réserves en eau et nutriments plus profondes pour les faire remonter vers la culture, espèce fixatrice d'azote, présentant un intérêt agronomique et économique via la possibilité de l'exploiter à différents stades (bois d'œuvre...). La rotation est une succession de cultures céréales/légumineuses et également selon le climat, permettant ou non le semis de certaines espèces à certaines périodes. La rotation n'est donc pas prédéfinie. En 2023 (année principale

d'acquisition des données), le travail du sol sur les zones cultivées a débuté mi-janvier et le semis de l'orge de printemps a été réalisé fin janvier.

Stratégie d'échantillonnage

Le dispositif expérimental s'articule autour de trois types d'usages du sol : grande culture monospécifique, plantation forestière, agroforesterie en lignes et allées. Cependant, au sein des placettes agroforestières, la bande herbacée et l'allée cultivée sont considérées comme deux habitats différenciés de par leur couverture, où des fonctions contrastées pourraient être observées.

Quatre modalités liées à des usages du sol sont donc étudiées : le témoin agricole (C), le témoin forestier (F) et en agroforesterie, le linéaire sous arboré (AF-LSA) et l'allée cultivée (AF-C).

Cinq points géoréférencés ont été choisis au sein de chaque modalité et bloc et représentent les cinq répétitions terrain. Ces points sont répartis sur l'ensemble des placettes agricoles et de plantation forestière pour en saisir la variabilité. Au sein des placettes agroforestières, les points étudiés dans la bande enherbée (LSA) et au centre de l'allée cultivée sont placés sur le même transect de façon à faire concorder les répétitions pour ces deux modalités. Au total, pour chaque variable mesurée (biodiversité, fonction), soixante valeurs sont obtenues sur le dispositif.

Résultats

Les résultats acquis portent sur un grand nombre d'organismes (des sols et de la surface, ainsi que de la végétation, herbacée ou arbustive) et des fonctions qu'ils remplissent.

Biodiversité

Résultats globaux. Plusieurs centaines de taxa ont pu être identifiés par les différentes approches que nous avons utilisées : métaséquençage de l'ADN environnemental (bactéries, champignons, protistes), extraction par appareil de Baerman (nématode), Macfadyen (microarthropodes), tri manuel des sols (macroinvertébrés dans les sols), piège barber (macroarthropodes de surface des sols), pièges colorés (arthropodes volant dans la canopée), dissection de rameaux de feuilles (arthropodes foliaires), camera automatique (mammifères), photographie (pollinisateur). Cela donne accès à un inventaire quasi exhaustif des différents taxa et groupes trophiques présentant sur le site durant la saison de croissance de la végétation (certains protocoles ont été réalisés trois fois pendant le printemps).

Mammifères et herbivorie. L'activité-densité des lapins était plus importante en agroforesterie qu'en culture monospécifique. La présence d'arbre et d'une bande enherbée offre un refuge à ces mammifères, leur permettant de se cacher des prédateurs ou leur permettant d'accéder à une diversité de ressources. Sur le dispositif, les lapins sont présents en grande quantité et consomment les cultures, leur impact sur la culture a été évalué. La consommation de plants d'orge (suivi par photographie à plusieurs dates), lors de la levée amène à un plus faible taux de couverture végétale en agroforesterie. Cependant, le taux de couverture végétale est le même au stade montaison, indiquant une récupération forte du peuplement d'orge.

Insectes volants. La diversité d'invertébrés volants est plus importante en présence d'arbres (F et AF_LSA) qu'en zone cultivée (C et AF_C) ce qui confirme que l'augmentation de la diversité végétale (planifiée) induit une augmentation de la diversité animale spontanée.

Toutefois, plus d'individus ont été collectés dans les pièges colorés posés en culture monospécifique que dans ceux posés en plantation forestière. Les parcelles d'agroforesterie présentent des valeurs intermédiaires : les abondances d'individus collectées sont plus proches de celles en culture monospécifique en mars et de celles en plantation forestière en avril. De plus, il existe des degrés d'état de la matrice environnementale qui modifient les possibilités de mouvement des organismes. La quantification de cette variation de la perméabilité de la matrice (ou, à l'inverse, de la résistance) reste un défi fondamental, mais dans notre cas, la perméabilité de l'habitat est probablement plus élevée dans les zones de culture que dans les habitats où des arbres et une plus grande densité de végétation spontanée sont présents. L'attribution des taxons aux différents groupes trophiques montrent un effet marqué des différents usages, qui change au cours de la saison de végétation.

Macrofaune de surface. La présence d'arbres n'impactait pas l'abondance et la diversité des invertébrés à la surface du sol. Ce résultat est assez surprenant puisque de précédentes études ont montré un impact positif significatif de l'agroforesterie sur l'abondance et la diversité des organismes du sol, par rapport aux cultures sans arbres. De la même manière, l'abondance et la diversité d'invertébrés herbivores et prédateurs, à la surface du sol, n'étaient pas impactées par la présence d'arbre en agroforesterie. Des différences d'abondances au sein de ces deux groupes trophiques ont parfois été observées entre la plantation forestière et la culture monospécifique, mais pas en termes de diversité. Ainsi, les communautés d'invertébrés à la surface du sol ne sont pas structurées par la modalité (C, AF_C, AF_LSA et F) sur le site DIAMS.

Nématodes libres. Nous avons observé une plus grande diversité d'herbivores et une plus faible diversité de prédateurs dans la culture monospécifique par rapport aux autres traitements. Plus précisément, les cinq herbivores identifiés (*Pratylenchus* spp., *Helicotylenchus* spp., *Trichodorus* spp., *Tylenchidae* spp, *Tylenchorhynchus* spp.) ont tous été retrouvés uniquement dans la culture monospécifique. Seul un prédateur (*Oxydirus* spp.) a été constamment trouvé dans la culture monospécifique alors que les autres prédateurs identifiés (*Discolaimus* spp., *Mononchus* spp., *Mylonchulus* spp.) étaient constamment absents de la culture monospécifique. Des relations proie-prédateur déjà rapportées peuvent avoir lieu dans les sols de Diams, par exemple *Helicotylenchus pseudorobustus*-*Mononchus* spp, *Helicotylenchus* spp-*Mylonchulus* spp et *Hirschmanniella oryzae*-*Discolaimus major*. Il pourrait être intéressant de confirmer ces relations trophiques et d'identifier des prédateurs spécifiques ou généralistes de *Pratylenchus* spp.

Fonctions des sols

Régulation des adventices. La régulation biologique post-dispersion des graines d'adventices a été évaluée à l'aide de carte de graines (5400 graines, appartenant à 3 espèces). La consommation des graines était la plus forte dans le témoin agricole (~70%), la plus faible dans le témoin forestier (~30%). Les deux habitats agroforestiers présentaient des valeurs intermédiaires et non différentes. Ce résultat illustre que les communautés de granivores de fin d'hiver, principalement les Carabidae sur ce dispositif, sont plus actives dans les parcelles agricoles que dans leur équivalent agroforestier et forestier, probablement par la sélection d'un cortège d'espèces adaptées.

Régulation des nématodes phytoparasites. La capacité du sol à supprimer les nématodes phytoparasites a été évaluée dans un essai de laboratoire avec *Meloidogyne javanica*. Dans les échantillons prélevés sous couvert végétal, la capacité de suppression des sols a été améliorée par rapport à celle des échantillons prélevés dans les cultures monospécifiques. Au

champ, la caractérisation des communautés de nématodes n'avait pas révélé la présence de *Meloidogyne* spp, mais d'autres nématodes parasites des plantes ont été trouvés. La densité totale de *Pratylenchus* spp. était plus faible, tandis que la densité relative d'*Helicotylenchus* spp. était plus élevée sous le couvert des arbres, par rapport aux sols de cultures monospécifiques. La capacité de suppression en agroforesterie était associée à une nématofaune spécifique, comprenant plus de taxons prédateurs que dans la culture monospécifique.

Régulation des insectes. Les nématodes entomopathogènes (NEPs) sont des organismes piliers des réseaux trophiques du sol jouant un rôle dans la régulation de populations d'insectes et sont utilisés comme agent de biocontrôle. La recherche de NEPs natifs par piégeage ex situ utilisant des insectes comme appâts a été effectuée afin d'étudier l'influence de l'agroforesterie sur leur abondance et leur diversité. Aucun NEP natif n'a pu être récolté mais un champignon entomopathogène du genre *Beauveria* a été mis en évidence en fréquence plus élevée en agroforesterie. De plus, l'introduction de différentes souches de NEPs dans des échantillons de sols provenant des différents habitats (agroforesterie ; culture ; plantation) a été faite pour évaluer l'impact sur leur cycle parasitaire. L'agroforesterie semble avoir un impact positif sur le cycle parasitaire des NEPs.

Dynamique des matières organiques. L'analyse du taux de dégradation de litière de Robinier dans une expérience de *litterbag* a globalement mis en évidence de faibles pertes de masses de litière après 5 semaines à la surface des sols étudiés, avec une moyenne sur le dispositif de 6,8 %. Le printemps 2023 ayant été très sec, la quasi absence de pluie a certainement influencé directement la décomposition de la litière. Toutefois une différence significative entre les taux de perte de masse a été détectée entre le témoin forestier et l'allée cultivée en agroforesterie, mais pas avec le témoin cultivé. L'hypothèse principale de ce résultat a trait à la qualité de la litière de Robinier, selon qu'il pousse en allée isolée ou en plantation dense et son degré d'attaque par les herbivores foliaires (différents entre les deux types de peuplements de Robinier). Cette hypothèse a été testée en 2024 sur le site DIAMS et a apporté des éléments congruents sur le rôle des herbivores foliaires sur la vitesse de décomposition de la litière plusieurs mois plus tard.

Stabilité structurale. La stabilité de la structure des sols est modifiée par le type d'usage. Les macroagrégats des sols sous cultures annuelles (C, AF-C) ont un diamètre moyen pondéré (DMP) après désagrégation à l'eau plus faible que les sols sous arbres (F, AF-LSA). Les DMP mesurés indiquent que les agrégats sont sensibles à l'action destructive de l'eau, cela ayant des conséquences sur le comportement physique du sol lors de phénomènes de forte pluie ou de ruissellement, typique des sols méditerranéens. La vitesse d'infiltration de l'eau dans les sols était significativement augmentée dans le linéaire sous arboré en comparaison à l'allée cultivée en agroforesterie, indiquant un rôle positif de l'implantation d'allées d'arbres sur le comportement hydrique de la parcelle. La stabilité structurale et la vitesse d'infiltration de l'eau était fortement corrélée à la teneur en C des sols, indiquant le rôle structurant de l'amélioration du statut organique des sols sur les autres fonctions.

CONCLUSIONS

Ces résultats demandent encore une certaine maturation, notamment pour interconnecter les patrons de diversité et de fonctions dans ces agroécosystèmes. Certains résultats sont publiés ou le seront prochainement. D'autres ne le seront pas mais serviront de support à une réflexion plus générale sur l'évaluation de la biodiversité au cours de la diversification des agroécosystèmes soumis aux contraintes climatiques méditerranéennes.

Valorisation

Masson, A.-S., Bouton, F., Bellafiore, S., Aribi, J., Marsden, C., Hedde, M., Trap, J. Soil fauna in agroforestry contributes to the suppressiveness to plant-parasitic nematodes: a case study in a Mediterranean area. *Applied Soil Ecology* **208**, 105962. <https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2025.105962>

Masson, A.-S., Le Guillaume, N., Gaudriault, S., Hedde, M. Evaluer la multifonctionnalité d'un système spatialement hétérogène – Cas d'étude en agroforesterie méditerranéenne. Journées Nationales du réseau TEBIS, Montpellier, 7-9/10/2024

Forest, M., N'gao, J., Piton, G., Dugué, R., Arnal, D., et al. (2022) How to study crop and herbaceous vegetation phenology in an agroforestry system? Phenology 2022, Avignon, France.

Hedde, M., Bérard, A. (2022) Interactions pratiques culturelles, biodiversité cultivée, biodiversité associée, fonctionnement et fonctions multiples des sols dans les systèmes agricoles diversifiés Colloque INRAE (ACT-Agroecosystem) « Les systèmes agricoles diversifiés : état des lieux et perspectives de recherche », 22-24/05/2022

Hedde, M. (2024) Comment caractériser la biodiversité des sols des systèmes diversifiés ? Séminaire INRAE (Ecodiv-Agroecosystem). 21-22/11/2024

De nombreux organismes ont été collectés pendant la campagne d'échantillonnage IFOSSA, dont certains ne sont pas dans le cœur de métier des partenaires du projet. Beaucoup de spécialistes ont été sollicités pour leur détermination.

De plus de nombreuses personnes ont participé à l'identification/vérification des animaux au travers de la plateforme collaborative INaturalist. Le projet regroupant les images postées est : https://www.inaturalist.org/projects/diams_global?tab=species