

➤ **Metagroforestry**

La gestion et l'agencement spatial des systèmes agroforestiers comme leviers du recyclage de l'azote : une approche par modélisation de type méta-écosystème

Métaprogramme BIOSEFAIR

Bilan de projet : période 2024 - 2026

Janvier 2026

Les systèmes agroforestiers (SAF) associent arbres, cultures et/ou pâturages afin d'optimiser la production agricole tout en améliorant la fourniture de services écosystémiques. Leur fonctionnement repose sur des interactions complexes entre sous-unités végétales et pédologiques, dont l'intensité dépend étroitement de l'organisation spatiale du système et des pratiques agricoles associées. Parmi les processus clés gouvernant ces interactions, le cycle de l'azote joue un rôle central dans la productivité végétale, la fertilité des sols et la durabilité des SAF.

Ce projet s'est appuyé sur l'hypothèse que l'agencement spatial des sous-unités d'un SAF, combiné aux pratiques de gestion, constitue un levier majeur pour influencer les flux, la distribution et la conservation de l'azote au sein du système, via des mécanismes de complémentarité et de transfert entre sous-unités. L'objectif principal était de développer un cadre de modélisation permettant d'analyser conjointement les effets de l'organisation spatiale et des pratiques agricoles sur la dynamique de l'azote, et d'en évaluer les conséquences sur la production végétale et la fertilité du système.

Pour atteindre cet objectif, le projet a mobilisé une approche de modélisation fondée sur le concept de méta-écosystème, représentant explicitement les différentes sous-unités constitutives d'un SAF (arbres, cultures, couverts herbacés) et les flux d'azote qui les relient. Le SAF est ainsi décrit comme un ensemble d'écosystèmes interconnectés par des flux de matière, dont l'intensité dépend à la fois de la configuration spatiale et des pratiques de gestion.

Un modèle mathématique dynamique, basé sur un système d'équations différentielles, a été construit pour décrire les stocks et flux d'azote au sein de chaque sous-unité et entre sous-unités. Les paramètres spatiaux du modèle correspondent aux surfaces relatives des sous-unités et à leurs zones de chevauchement fonctionnel, définies par la distribution spatiale des chutes de litière arborée et par la répartition horizontale et verticale des systèmes racinaires des arbres. Ces chevauchements conditionnent l'intensité des transferts d'azote entre sous-unités, notamment via les apports de litière et la compétition pour l'acquisition des ressources du sol.

Le modèle intègre également la présence de racines arborées en profondeur, permettant de représenter un effet de « safety net », par lequel les arbres peuvent capter l'azote soumis à la lixiviation vers les horizons profonds et contribuer à sa redistribution vers les couches superficielles via la litière. Les pratiques agricoles (semis, récoltes, fertilisation, gestion des résidus, taille des arbres) sont intégrées sous forme de perturbations des stocks et des flux, afin de représenter le caractère géré et temporellement structuré des SAF.

Le modèle a été appliqué à un système agroforestier méditerranéen étudié sur le site expérimental instrumenté DIAMs (Mauguio). Sa paramétrisation s'est appuyée sur des données existantes, complétées par de nouvelles mesures de terrain portant sur les teneurs en azote de différentes biomasses végétales des sous-unités du système. Ces mesures ont permis de renseigner les teneurs en azote des différentes composantes végétales du système et d'en intégrer les ordres de grandeur dans le modèle.

Les résultats montrent que l'organisation spatiale du SAF, en interaction avec les pratiques agricoles, structure fortement la distribution des stocks et flux d'azote entre sous-unités, avec des conséquences sur la production végétale et la capacité du système à limiter les pertes d'azote par lixiviation. Au-delà du cas étudié, le projet fournit un cadre de modélisation générique et transférable, permettant d'explorer des scénarios de gestion et de spatialisation des SAF, et contribuant à une meilleure compréhension du fonctionnement biogéochimique de ces agroécosystèmes complexes.

Résultats détaillés

Le projet avait pour objectif d'analyser le rôle de l'organisation spatiale et des pratiques de gestion dans le fonctionnement des systèmes agroforestiers, à travers une approche explicitement centrée sur la dynamique du recyclage de l'azote. Il s'appuyait sur le développement d'un cadre de modélisation fondé sur le concept de méta-écosystème, conçu pour représenter explicitement les relations entre l'organisation spatiale des sous-unités d'un système agroforestier, les flux d'azote qui les relie et leurs effets sur la production végétale et la conservation de l'azote au sein du système.

Le principal résultat du projet est le développement d'un modèle mathématique dynamique décrivant les stocks et flux d'azote au sein d'un système agroforestier, intégrant explicitement sa structure spatiale et les pratiques agricoles. Le modèle est actuellement implémenté sous R ; le code est fonctionnel et permet de réaliser des simulations dynamiques, même si certaines fonctions restent en cours de finalisation, notamment celles relatives à la gestion des résidus et à la représentation de la fixation symbiotique de l'azote. Le modèle repose sur une représentation du système agroforestier comme un ensemble de sous-unités interconnectées (arbres, cultures, bandes enherbées), entre lesquelles circulent des flux d'azote. Les paramètres spatiaux pris en compte correspondent aux surfaces relatives des sous-unités et à leurs zones de chevauchement fonctionnel, définies à partir de la distribution spatiale des chutes de litière arborée et de la répartition horizontale et verticale des systèmes racinaires des arbres, et conditionnant l'intensité des transferts d'azote entre sous-unités.

La présence de racines arborées en profondeur est intégrée afin de représenter un effet de type « safety net », par lequel les arbres peuvent capter l'azote soumis à la lixiviation vers les horizons profonds et contribuer à sa redistribution vers les couches superficielles du sol via les apports de litière. Les pratiques agricoles (semis, récoltes, fertilisation, gestion des résidus, taille des arbres) sont représentées sous forme de perturbations des stocks et des flux d'azote, permettant de rendre compte du caractère géré et temporellement structuré des systèmes agroforestiers. Différentes simulations peuvent être produites à partir du modèle, permettant la comparaison de scénarios d'organisation spatiale et de scénarios de pratiques de gestion. Ces simulations offrent la possibilité, pour un jeu de paramètres donné, d'explorer de manière systématique les réponses du système et d'identifier des configurations susceptibles d'optimiser différents critères de performance, en analysant les compromis et synergies entre la production végétale globale du système, la production de chacune des sous-unités (arbres, cultures, bandes enherbées), et la conservation ainsi que l'utilisation de l'azote au sein du système.

Le modèle a été appliqué à un système agroforestier méditerranéen de type « alley cropping » étudié sur le site expérimental instrumenté DIAMs (Mauguio). Sa paramétrisation s'est appuyée sur des données existantes, complétées par un effort conséquent d'acquisition de nouvelles données : environ 1000 échantillons de biomasses végétales ont été analysés pour leur teneur en azote au CHN. Ces données ont permis de renseigner les ordres de grandeur des teneurs en azote des différentes composantes végétales du système et d'améliorer la cohérence des compartiments végétaux du modèle par rapport aux observations réalisées sur le site. Sur le plan scientifique, une publication est actuellement en préparation, et deux rapports de stage de niveau M2 ont été produits par des étudiants ayant contribué à la construction, à la paramétrisation et à l'analyse du modèle.

Les objectifs du projet sont partiellement atteints. L'objectif principal de développement d'un cadre de modélisation intégrant organisation spatiale, pratiques agricoles et dynamique du recyclage de l'azote a été atteint sur le plan conceptuel et méthodologique, et le modèle permet d'explorer l'influence de paramètres spatiaux et de pratiques de gestion sur les stocks et flux

d'azote, avec une cohérence satisfaisante vis-à-vis des observations réalisées sur le site DIAMs. En revanche, le modèle n'a pas encore atteint un niveau de maturité permettant de simuler un large éventail de configurations spatiales au-delà des paramètres actuellement implémentés, ni une forme directement exploitable par un utilisateur extérieur. L'exploration de différents types de systèmes agroforestiers n'a pas été réalisée, le travail s'étant concentré sur un système de type « alley cropping », et certaines tâches initialement prévues, telles que la réalisation d'une typologie des systèmes agroforestiers, l'acquisition de mesures de flux d'azote ou le recours au traçage isotopique, n'ont pas pu être menées. Le projet a fait le choix de s'appuyer sur les données existantes du site expérimental et de les compléter par des mesures ciblées de teneurs en azote des biomasses végétales.

Au cours du projet, le périmètre des travaux a été ajusté afin de concentrer les efforts sur la construction, la formalisation et la stabilisation du modèle, ce qui a permis de consolider le cadre conceptuel et mathématique et de renforcer la cohérence interne de l'outil développé. Plusieurs difficultés ont été rencontrées, en particulier pour l'intégration de la fixation symbiotique de l'azote de manière réaliste, notamment pour représenter l'inhibition de la fixation en fonction de la disponibilité en azote minéral du sol. Certains paramètres clés du modèle n'étaient pas directement disponibles dans la littérature ou dans les jeux de données existants et ont été estimés à l'aide d'analyses de sensibilité. Par ailleurs, le comportement du modèle s'est montré sensible à certains paramètres liés à l'absorption de l'azote, nécessitant un travail itératif de réglage et de validation. Enfin, les simulations réalisées à partir du modèle sont numériquement lourdes et nécessitent des temps de calcul relativement longs, ce qui contraint pour l'instant l'exploration exhaustive de l'espace des scénarios et constitue un point d'attention pour les développements futurs.

Les retombées du projet sont principalement méthodologiques et conceptuelles. Le cadre de modélisation développé permet d'analyser de manière intégrée les effets de l'organisation spatiale et des pratiques de gestion sur le cycle et le recyclage de l'azote dans les systèmes agroforestiers, en mettant en évidence l'importance de la distribution spatiale des sous-unités, des zones de chevauchement fonctionnel et du rôle potentiel des racines profondes dans la limitation des pertes d'azote par lixiviation. Le modèle constitue ainsi une base pour formuler des recommandations générales pour un système donné, en identifiant des scénarios de gestion et d'organisation spatiale favorables à la fois à la production végétale et à la conservation de l'azote. À plus long terme, il pourrait être rendu plus générique et adapté à d'autres systèmes agroforestiers, afin d'être mobilisé par d'autres équipes et pour d'autres contextes pédoclimatiques, et ouvrir des perspectives pour le développement d'outils d'aide à la conception et à la gestion des systèmes agroforestiers fondés sur une compréhension mécaniste du fonctionnement du cycle de l'azote.

Perspectives scientifiques.

À l'issue de cette action, plusieurs perspectives scientifiques se dégagent, tant sur le plan conceptuel que méthodologique, et ouvrent de nouvelles questions de recherche autour de la modélisation des systèmes agroforestiers et du fonctionnement du cycle et du recyclage de l'azote.

Une première perspective concerne l'adaptation et l'extension du cadre de modélisation développé à d'autres configurations spatiales et à d'autres types de systèmes agroforestiers. Le modèle a été conçu et appliqué dans le cadre d'un système de type alley cropping en contexte méditerranéen, mais son application à des systèmes tempérés ou tropicaux,

présentant des structures spatiales, des densités arborées et des dynamiques de croissance contrastées, permettrait d'élargir le champ d'analyse. Une telle extension offrirait la possibilité d'examiner la robustesse des mécanismes représentés et d'identifier les paramètres structurants du fonctionnement du cycle de l'azote selon les contextes pédoclimatiques.

Une seconde perspective porte sur l'intégration explicite des changements climatiques et de la saisonnalité des processus dans le cadre de la modélisation. La prise en compte de modifications de la durée et du positionnement de la saison de croissance, en lien avec l'évolution des conditions climatiques, combinée à une représentation plus fine de la saisonnalité de processus tels que la minéralisation de l'azote organique ou les pertes d'azote, permettrait d'analyser leurs effets sur la production végétale, la dynamique du recyclage de l'azote et les interactions entre sous-unités des systèmes agroforestiers. Cette approche offrirait également la possibilité d'explorer les décalages temporels entre disponibilité de l'azote, demande des cultures et conditions environnementales dans un contexte de changements climatiques.

Enfin, le cadre développé ouvre la voie à l'intégration d'autres services écosystémiques associés à la présence des arbres et des surfaces enherbées. L'ajout de services tels que la séquestration du carbone, la régulation hydrique, la pollinisation, la régulation des ravageurs et pathogènes, la protection contre l'érosion ou le maintien de la biodiversité permettrait d'analyser les compromis et synergies entre ces services, la production végétale et ceux liés au cycle de l'azote. Cette perspective s'inscrit dans une approche plus intégrée de l'évaluation des performances des systèmes agroforestiers et soulève des questions de recherche sur la manière de représenter conjointement production végétale et services écosystémiques dans des agroécosystèmes spatialement hétérogènes et gérés.