

POTENTIALITÉS DE L'AGROFORESTERIE DANS LE GRAND-EST DE LA FRANCE

Projet PotA-GE

RAPPORT FINAL

Nov.
2022



EXPERTISES

REMERCIEMENTS

Les auteurs de ce rapport remercient toutes les personnes qui sont intervenues dans la conduite des dispositifs expérimentaux et dans l'acquisition des données au champ et au laboratoire. Ils remercient également les nombreux stagiaires qui ont travaillé dans le cadre du projet (voir liste en fin de document). Les partenaires de PotA-GE remercient chaleureusement les membres externes du comité de pilotage, Delphine MEZIERE (INRAE), Rémi CARDINAEL (CIRAD) et Marie GOSME (INRAE), ainsi que Thomas EGLIN (ADEME) pour leur participation constructive et enthousiaste aux quatre comités de pilotage ayant jalonné les cinq années du projet.

CITATION DE CE RAPPORT

MARRON Nicolas, PIUTTI Séverine, LACROIX Thomas, COCHARD Patrick, CLIVOT Hugues, THEROND Olivier, PLAIN Caroline, LAFLOTTE Alexandre, 2022. **Projet PotA-GE : évaluer les potentialités de l'agroforesterie dans le Grand-Est de la France. Rapport final.** 66 pages.

Cet ouvrage est disponible en ligne <https://librairie.ademe.fr/>

Toute représentation ou reproduction intégrale ou partielle faite sans le consentement de l'auteur ou de ses ayants droit ou ayants cause est illicite selon le Code de la propriété intellectuelle (art. L 122-4) et constitue une contrefaçon réprimée par le Code pénal. Seules sont autorisées (art. 122-5) les copies ou reproductions strictement réservées à l'usage privé de copiste et non destinées à une utilisation collective, ainsi que les analyses et courtes citations justifiées par le caractère critique, pédagogique ou d'information de l'oeuvre à laquelle elles sont incorporées, sous réserve, toutefois, du respect des dispositions des articles L 122-10 à L 122-12 du même Code, relatives à la reproduction par reprographie.

Ce document est diffusé par l'ADEME

ADEME

20, avenue du Grésillé

BP 90 406 | 49004 Angers Cedex 01

Numéro de contrat : 17-03-C0008

Projet de recherche coordonné par : Nicolas MARRON

Appel à projet de recherche : GRAINE 2016

Coordination technique - ADEME : EGLIN Thomas, ingénieur

Direction/Service : Service Réseaux et Energies Renouvelables, Direction Bioéconomie et Energies Renouvelables

Table des matières

1. CONTEXTE DU PROJET	7
2. METHODOLOGIE	9
2.1. État des lieux des plantations agroforestières dans le Grand-Est	9
2.1.1. Recensement des plantations agroforestières à l'échelle régionale	9
2.1.2. Sélection de sites en situations contrastées	9
2.2. Évaluation des performances et du fonctionnement des plantations agroforestières dans le Grand-Est (indicateurs biophysiques)	10
2.2.1. Estimation de l'effet de l'introduction des arbres sur la distribution des ressources, les rendements et la croissance	10
2.2.1.1. Site Pilote.....	10
2.2.1.2. Premier cercle de sites	11
2.2.2. Estimation de l'effet de l'introduction des arbres sur le fonctionnement des sols – Évolution de l'abondance des communautés microbiennes, des pools de matières organiques et processus de décomposition/minéralisation des matières organiques.....	11
2.2.2.1. Protocole d'échantillonnage sur le site Pilote	11
2.2.2.2. Protocole d'échantillonnage sur les sites du 1 ^{er} cercle.....	12
2.2.2.3. Variables mesurées	13
2.2.3. Estimation de l'effet de l'introduction des arbres en termes de bilan environnemental : bilans de gaz à effet de serre (GES) et stocks de carbone des sols	13
2.2.3.1. Bilans de gaz à effet de serre	13
2.2.3.2. Stocks de carbone des sols.....	14
2.3. Évaluation multicritère des potentialités des plantations agroforestières dans le Grand-Est (indicateurs socioéconomiques)	14
2.4. Développement des modules biophysiques agroforestiers dans la plateforme de simulation MAELIA et évaluation de scénarios de déploiement de systèmes agroforestiers sur différents territoires	16
2.4.1. Intégration des modules de dynamiques et d'interactions arbre, culture et sol dans MAELIA.....	16
2.4.2. Évaluation du modèle agroforestier et ajustement de paramètres	17
2.4.2.1. Compilation de données arbres et cultures pour évaluer les modules de croissance	17
2.4.2.2. Comparaison des biomasses simulées avec des données mesurées/estimées avec les paramétrages par défaut du modèle et après ajustements	17
2.4.3. Scénarios de déploiement de systèmes agroforestiers dans différents territoires du Nord-Est de la France	17
3. BILAN / PRINCIPAUX RESULTATS OBTENUS	19
3.1. État des lieux des plantations agroforestières dans le Grand-Est	19
3.1.1. Recensement des plantations agroforestières à l'échelle régionale	19
3.1.1.1. Enquêtes et genèse de la base de données	19
3.1.1.2. Caractérisation des sites répertoriés en Grand-Est.....	20
3.1.1.2.3. Description des parcelles et des plantations	22
3.1.2. Sélection de sites en situations contrastées	25
3.2. Évaluation des performances et du fonctionnement des plantations agroforestières dans le Grand-Est (indicateurs biophysiques)	26
3.2.1. Estimation de l'effet de l'introduction des arbres sur la distribution des ressources, les rendements et la croissance	26

3.2.1.1.	Site Pilote.....	26
3.2.1.1.1.	Composante agricole.....	26
3.2.1.1.2.	Composante arborée.....	26
3.2.1.2.	Premier cercle de sites	29
3.2.2.	Estimation de l'effet de l'introduction des arbres sur le fonctionnement des sols – Évolution des pools de matières organiques et processus de décomposition / minéralisation des matières organiques	35
3.2.2.1.	Site Pilote.....	35
3.2.2.2.	Premier cercle de sites	38
3.2.3.	Estimation de l'effet de l'introduction des arbres en termes de bilan environnemental : bilans de gaz à effet de serre (GES) et stocks de carbone des sols	41
3.2.3.1.	Bilans de gaz à effet de serre	41
3.2.3.2.	Stocks de carbone des sols.....	42
3.3.	Évaluation multicritère des potentialités des plantations agroforestières dans le Grand-Est (indicateurs socioéconomiques).....	46
3.4.	Développement des modules biophysiques agroforestiers dans la plateforme de simulation MAELIA et évaluation de scénarios de déploiement des systèmes agroforestiers sur différents territoires.....	49
3.4.1.	Évaluation des modules de croissance du modèle agroforestier et ajustement de paramètres ..	49
3.4.2.	Scénarios de déploiement de systèmes agroforestiers pour différents territoires du Nord-est de la France	53
3.5.	Synthèse des indicateurs - Dissémination / Valorisation des résultats auprès des utilisateurs.....	54
3.5.1.	Valorisation scientifique	55
3.5.2.	Valorisation par la formation	55
3.5.3.	Sensibilisation / Information des agriculteurs	55
4.	RECOMMANDATIONS.....	56
5.	CONCLUSION / PERSPECTIVES	57
	REFERENCES CITEES	61
	INDEX DES TABLEAUX, FIGURES ET ANNEXES.....	63
	SIGLES ET ACRONYMES.....	66
	ANNEXES.....	68

RÉSUMÉ

Dans un contexte européen où l'agroforesterie apparaît comme une voie de diversification des exploitations agricoles, l'objectif général du projet était d'évaluer les potentialités des plantations agroforestières à l'échelle du Grand-Est de la France sur la base d'indicateurs socioéconomiques et biophysiques.

L'impact de l'introduction d'arbres dans les cultures agricoles a été évalué à trois échelles : (1) une analyse fine des processus biophysiques sur le site Pilote de la Bouzule (mélanges d'espèces fixatrices / non fixatrices d'azote : peuplier / luzerne-trèfle et aulne / graminées), (2) une comparaison de certains des processus en les transposant à un premier cercle de plantations (se prêtant à la mise en place d'un plan d'expérience robuste) permettant d'initier la paramétrisation de modèles de fonctionnement et (3) une analyse socioéconomique de l'ensemble des plantations de la région (2^{ème} cercle de plantations).

Les indicateurs biophysiques étudiés sont de trois types : (1) agronomiques (croissance et production des cultures), (2) édaphiques (fonctionnement des sols via la minéralisation de la matière organique et, le recensement des communautés microbiennes) et (3) environnementaux (bilan des gaz à effet de serre, stockage du carbone dans les sols). Des enquêtes menées auprès des agriculteurs régionaux ont permis de renseigner les indicateurs socioéconomiques : intérêt pour les systèmes agroforestiers, freins pour s'engager, besoins pour lever les verrous, etc.

Environ 70 plantations en agroforesterie intra-parcellaire ont été recensées dans la région. En termes biophysiques, d'intéressants effets de l'introduction des arbres ont été observés en termes de rendements, de partage de la ressource en eau entre espèces, de stockage du carbone dans le sol, de fonctionnement organique de sols ou encore de flux de gaz à effet de serre, mais ces effets sont encore légers en raison de la relative jeunesse des plantations étudiées (la plus ancienne ayant une dizaine d'années). En termes socioéconomiques, plus de 300 agriculteurs ont répondu aux enquêtes menées dans le cadre du projet. Sans grande surprise, les principaux freins au développement de l'agroforesterie intra-parcellaire dans la région sont le manque d'accompagnement des projets des agriculteurs dans ce sens et l'insuffisance des aides financières ; ces deux aspects sont cependant pris en charge mais de façon assez hétérogène selon les départements. En outre, la plateforme de modélisation MAELIA a été étendue pour simuler les systèmes agroforestiers. Des simulations ont été réalisées à l'échelle de parcelles sur trois territoires d'étude afin d'évaluer des scénarios de déploiement de l'agroforesterie dans la région. Les résultats obtenus sont en cours de diffusion auprès des acteurs sous la forme de modules de formation et de journées d'information.

ABSTRACT

In an European context where agroforestry appears as a way of diversifying farms, the general objective of the project was to assess the potential of agroforestry plantations at the scale of the Grand-Est region of France based on socioeconomic and biophysical indicators.

The impact of the introduction of trees in agricultural lands was assessed at three levels: (1) a detailed analysis of the biophysical processes on the Pilot site of La Bouzule (mixtures of nitrogen-fixing/non-fixing species: poplar / alfalfa-clover and alder / graminoids), (2) a comparison of some of the processes by transposing them to a first circle of plantations (robust enough to allow the implementation of an experimental design) and (3) a socioeconomic analysis of all the plantations in the region (2nd circle of plantations).

The biophysical indicators studied are of three types: (1) agronomic (crop and tree growth and production), (2) edaphic (soil functioning via the mineralization of organic matter and the inventory of microbial communities) and (3) environmental (greenhouse gas balance, carbon storage in soils). Surveys conducted among regional farmers have provided information about socio-economic indicators: interest in agroforestry systems, obstacles to getting involved, needs to remove obstacles, etc.

About 70 alley cropping agroforestry plantations have been identified in the region. In biophysical terms, interesting effects of the introduction of trees have been observed in terms of yields, sharing of water resources between species, storage of carbon in the soil, organic functioning of soils or fluxes of greenhouse gases, but these effects are still slight due to the relative youth of the studied plantations (the oldest one being about ten years old). In socioeconomic terms, more than 300 farmers responded to surveys conducted under the framework of the project. Unsurprisingly, the main obstacles to the development of intra-plot agroforestry in the region are the lack of technical and financial supports for farmers' projects; these two aspects are however taken in consideration but in a rather heterogeneous way according to the departments. In addition, the MAELIA modeling platform has been adapted to allow simulating agroforestry systems. Simulations were carried out for different situations representative of three territories in order to assess scenarios for the deployment of agroforestry in the region. The results of the project are being disseminated to stakeholders in the form of training modules and information seminars.

1. Contexte du projet

L'agroforesterie consiste à faire délibérément pousser des arbres en association avec des cultures agricoles et/ou en présence de troupeaux d'animaux pour en tirer des avantages (Nair et al. 2010, Dupraz and Liagre 2008). Les systèmes dit « agroforestiers » sont extrêmement variés ; récemment, Cardinael et al. (2018) en ont identifié huit types dans une revue systématique : (1) les systèmes intra-parcellaires (alley cropping systems), (2) les jachères (fallow), (3) les haies (hedgerows), (4) les systèmes multi-strates (multistrata systems), (5) les parcs (parklands), (6) les systèmes de culture vivace ombragé (shaded perennial crop systems), (7) les systèmes silvoarables et (8) les systèmes silvopastoraux. La pratique de l'agroforesterie apparaît actuellement comme une voie de diversification écologique des exploitations agricoles dans le contexte agricole européen (Smith et al. 2012) et l'arbre est considéré comme un levier agroécologique dans le Plan Stratégique National de la future PAC (AFAC, 2021). En effet, les intérêts potentiels de ce modèle de production sont nombreux tant du point de vue de la production agricole que de la protection de l'environnement (i.e. notion de services environnementaux). Des bénéfices et services tels qu'une augmentation de la productivité à surface équivalente, une réduction de l'érosion des sols ainsi qu'une amélioration de leur fertilité et de la qualité de l'eau ont en effet été observés dans des systèmes agroforestiers associant des arbres aux cultures agricoles (Nair et al. 2009, Kim et al. 2016). Les services attendus de la part des systèmes agroforestiers sont très nombreux, par exemple en termes d'amélioration de la biodiversité, du bien-être animal, de l'impact paysagé de l'agriculture, etc. Mais l'agroforesterie offre également des perspectives de production d'énergie « verte » à substituer aux énergies fossiles et de séquestration du carbone dans la biomasse et dans les sols plus intéressantes qu'un peuplement monospécifique annuel en raison des quantités de carbone importantes contenues dans la biomasse ligneuse, et des dépositions de carbone dans le sol via le turnover de racines fines, la rhizodéposition et les chutes de litières (Luedeling et al. 2014, Lorenz and Lal 2014). Dans un rapport sur le changement d'utilisation des terres et la foresterie (Land Use, Land-Use Change and Forestry, LULUCF), le groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC) a analysé diverses options de changement d'utilisation des terres et a considéré que l'agroforesterie présentait un potentiel considérable de séquestration du carbone (Verchot et al. 2007). Ces éléments sont repris dans l'étude 4 pour mille qui au niveau français indiquait un stockage additionnel sur l'horizon 0-30 cm de l'ordre de 207 kg C/ha/an (Pellerin et al. 2019) ; le potentiel de stockage de l'agroforesterie a récemment été revu à la hausse en prenant en compte la biomasse dans l'estimation : 4 Mg équivalent CO₂/ha/an pour un coût de 21€/Mg équivalent CO₂, en moyenne (Bamière et al. 2023). De plus, un des objectifs de la Stratégie Nationale Bas Carbone (SNBC2) est de développer les puits de carbone agricoles, en particulier en cherchant à multiplier par 5 les surfaces d'agroforesterie et de haies d'ici à 2050 par rapport à 2015. Ce potentiel n'est cependant à l'heure actuelle que peu caractérisé localement du fait d'une grande diversité des systèmes agroforestiers et de conditions pédoclimatiques contrastées à l'échelle française.

En France, le modèle agroforestier intrigue les agriculteurs et les initiatives individuelles se multiplient sans que l'on sache les quantifier à l'heure actuelle. En Lorraine, la chambre d'agriculture régionale a initié depuis 2014 la constitution d'un Comité Technique d'Agroforesterie réunissant des professionnels d'horizons variés intéressés par l'agroforesterie : chambres départementales d'agriculture, DRAAF, Agence de l'eau, INRA, ENSAIA, etc. Le comité se réunit régulièrement pour échanger et pour organiser le développement de l'agroforesterie sur le territoire. La question de la gestion de la composante forestière reste néanmoins souvent un obstacle à l'intérêt que peut présenter ce système de culture plurispécifique pour le monde agricole. Des indicateurs concrets des potentialités de développement du modèle agroforestier dans le grand quart nord-est de la France en termes de production, de certains services écosystémiques (régulation du climat par séquestration du carbone, régulation de la qualité de l'eau, régulation du cycle des éléments minéraux) et de réduction des impacts environnementaux (limitation des émissions de gaz à effet de serre, et lixiviation des nitrates), ainsi que des verrouillages et performances sociotechniques (difficultés et solutions techniques et rentabilité du système agroforestier) permettrait de mieux informer les agriculteurs et accompagner les initiatives. Le présent projet se propose d'évaluer les potentialités de l'agroforesterie dans le Grand-Est (Alsace Champagne-Ardenne Lorraine) sur la base d'indicateurs biophysiques et socioéconomiques de façon à mieux accompagner l'essor de ces pratiques. Dans ces systèmes multifonctionnels, les fonctions écosystémiques ciblées (émissions de gaz à effet de serre, dynamique des matières organiques du sol, disponibilité en éléments minéraux, etc.) sont en lien avec certains services de régulation (séquestration de carbone, fourniture d'éléments minéraux, recyclage des éléments) et de production (biomasse).

La figure 1 ci-dessous présente l'articulation des lots du projet ainsi que les échelles auxquelles les différents types d'indicateurs des performances des systèmes agroforestiers ont été renseignés (site Pilote, réseau de sites sélectionnés, ensemble des plantations agroforestières du Grand-Est). Il faut noter que l'estimation des rendements et des LER (land equivalent ratio) n'a pas été possible pour l'ensemble des plantations de la région comme cela était initialement prévu en raison de l'impossibilité de trouver des témoins sans arbre et sans culture pour l'ensemble des plantations de la région.

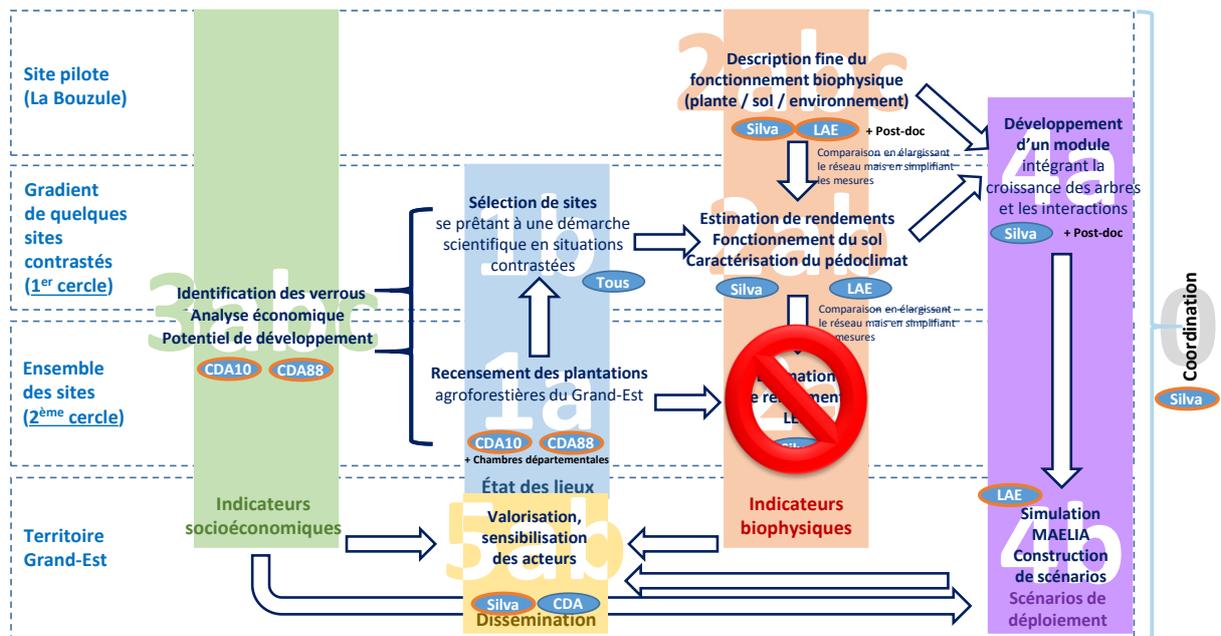


Figure 1. Articulation des lots du projet PotA-GE, échelles spatiales auxquelles ils seront réalisés (site Pilote, 1^{er} cercle de sites, ensemble des sites agroforestiers ou territoire) et partenaires impliqués (dans les cercles bleus ; Silva, LAE, CDA10, CDA88) et responsables (encerclés en orange).

2. Méthodologie

2.1. État des lieux des plantations agroforestières dans le Grand-Est

2.1.1. Recensement des plantations agroforestières à l'échelle régionale

L'objectif était d'établir un état des lieux régional des initiatives de plantation agroforestière et de réaliser une caractérisation des plantations en place. En Grand-Est, l'Agroforesterie est une pratique émergente à partir des années 2010-2012. En 2015, un premier travail, coordonné par la Chambre Régionale d'Agriculture de Lorraine, avait entrepris un recensement des plantations agroforestières en région Lorraine. Ainsi, le projet PotA-GE a fixé comme objectif de poursuivre ce recensement des plantations agroforestières en région Grand-Est sur la base de cette première étude.

Dès 2017, l'enjeu était d'établir un recueil et une caractérisation des parcelles agroforestières présentes dans le Grand-Est. Ainsi, un questionnaire d'enquête et une base de données ont été créés afin de réaliser ce recensement et cette caractérisation. Les acteurs concernés par ces travaux sont la CDA10 et de la CDA88 (coordinateurs), avec l'appui de la Chambre Régionale d'Agriculture (CRAL puis CRAGE), l'ensemble des chambres d'agriculture du Grand-Est et des membres du Comité Technique d'agroforesterie en place. En appui, huit étudiants ingénieurs de l'ENSAIA, spécialisation DEFI (Développement Durable des Filières agricoles), ont été encadrés afin de réaliser un premier travail d'enquêtes auprès des acteurs/conseillers en agroforesterie sur la Région Grand-Est :

- Rencontre de présentation et de préparation du travail : présentation du cahier des charges, présentation des attentes quant au questionnaire d'enquête et état des lieux des différents acteurs de l'agroforesterie dans le Grand-Est ;
- Réalisation des enquêtes / recensement auprès du réseau de conseillers et autres organismes ;
- Restitution de ce travail d'enquête et remise des résultats par les étudiants (base de données sous Access, réalisation de monographies) ;
- Dépouillement et mise en forme des résultats (CDA88 et CDA10).

Ce travail de recensement des dispositifs agroforestiers en place a été centré sur les dispositifs agroforestiers dit « alignements d'arbres en intra-parcellaire », à la demande du collège d'experts impliqué dans le projet. Comme pour l'ensemble de PotA-GE, les autres formes d'agroforesterie (haies, vergers, arbres champêtres, ripisylves, etc.) ne sont pas prises en compte de façon à restreindre le champ d'action pour focaliser notre démarche scientifique sur un type de système agroforestier unique (besoin d'un minimum d'homogénéité de l'objet d'étude) mais déjà très varié en termes de densité, de composition, d'âge, etc. La base de données ainsi initiée a été abondée au fil de l'eau jusqu'en janvier 2021, date où les cartes et les extractions de données définitives ont été produites.

Les résultats attendus étaient les suivants :

- Description des plantations en place et élaboration d'une fiche type « description de parcelle remarquable » (monographies en annexe) ;
- Réalisation d'une cartographie des plantations agroforestières – alignement d'arbres en intra-parcellaire ;
- Recueil et extraction des informations nécessaires au choix des sites destinés à constituer le 1^{er} cercle de sites de PotA-GE.

Cette dernière étape fut importante puisque déterminante pour certaines des activités des lots 2 et 4 du projet PotA-GE, reposant sur le premier cercle. Parmi les sites répertoriés, une sélection de huit sites en situation contrastées a été proposée (propositions, visites terrain et rencontre avec les agriculteurs gestionnaires des parcelles) et six sites ont été retenus. Ce travail de sélection des sites a été réalisé en partenariat avec les UMR Silva et LAE.

2.1.2. Sélection de sites en situations contrastées

Parmi les parcelles inventoriées, six ont été sélectionnées sur la base des critères suivants (tâche 1b) :

- Arbres âgés d'au moins deux ans,
- Choix d'essences destinées à la production de bois d'œuvre,
- Système de culture à orientation céréalière ou élevage (les systèmes intégrant des cultures maraîchères ont été exclus),
- Présence de la monoculture agricole à proximité,
- Densité de plantation des arbres proches (environ 30 arbres par hectare en général),
- Conditions pédoclimatiques représentatives de la région.

Les critères utilisés ont été choisis de façon à couvrir des situations contrastées tout en respectant une certaine homogénéité dans les caractéristiques des systèmes agroforestiers (type d'essences, densité des arbres, espace intra-parcellaire, etc.). À l'issue de cette sélection, les sites choisis se répartissent de façon équilibrée entre des systèmes céréaliers (dans les Ardennes et l'Aube) et de polyculture-élevage (en Lorraine) conduits en agriculture biologique ou en conventionnel.

2.2. Évaluation des performances et du fonctionnement des plantations agroforestières dans le Grand-Est (indicateurs biophysiques)

2.2.1. Estimation de l'effet de l'introduction des arbres sur la distribution des ressources, les rendements et la croissance

2.2.1.1. Site Pilote

Le site Pilote expérimental agroforestier est situé sur une parcelle de la ferme expérimentale de la Bouzule dans le nord-est de la France (48°44'19" N, 6°18'50" E, 219 m d'altitude, Meurthe-et-Moselle ; Figure 2). La plantation expérimentale a été installée au cours du printemps 2014 et mesure 448 m de long et 73 m de large, pour une superficie totale de 3.27 ha. Elle est composée de mélanges forestier et agroforestiers d'espèces fixatrices / non fixatrices d'azote ligneuses (peupliers et aulnes) et herbacées (succession luzerne / trèfle, graminées), ainsi que de leurs monocultures respectives. Chaque parcelle unitaire d'un traitement donné mesure environ 0.15 ha. Les parcelles forestières (monoculture et mélange forestier) ont été plantées à une densité de 2000 arbres par hectare tandis que les parcelles agroforestières comptent 1000 arbres par hectare, puisqu'une rangée d'arbres sur deux a été remplacée par une culture herbacée. La plantation compte 3600 arbres sur 100 lignes. Le dispositif est instrumenté (humidité et température de l'air, pluviométrie, vitesse du vent, irradiance, profils d'humidité du sol dans les différents traitements, etc.).

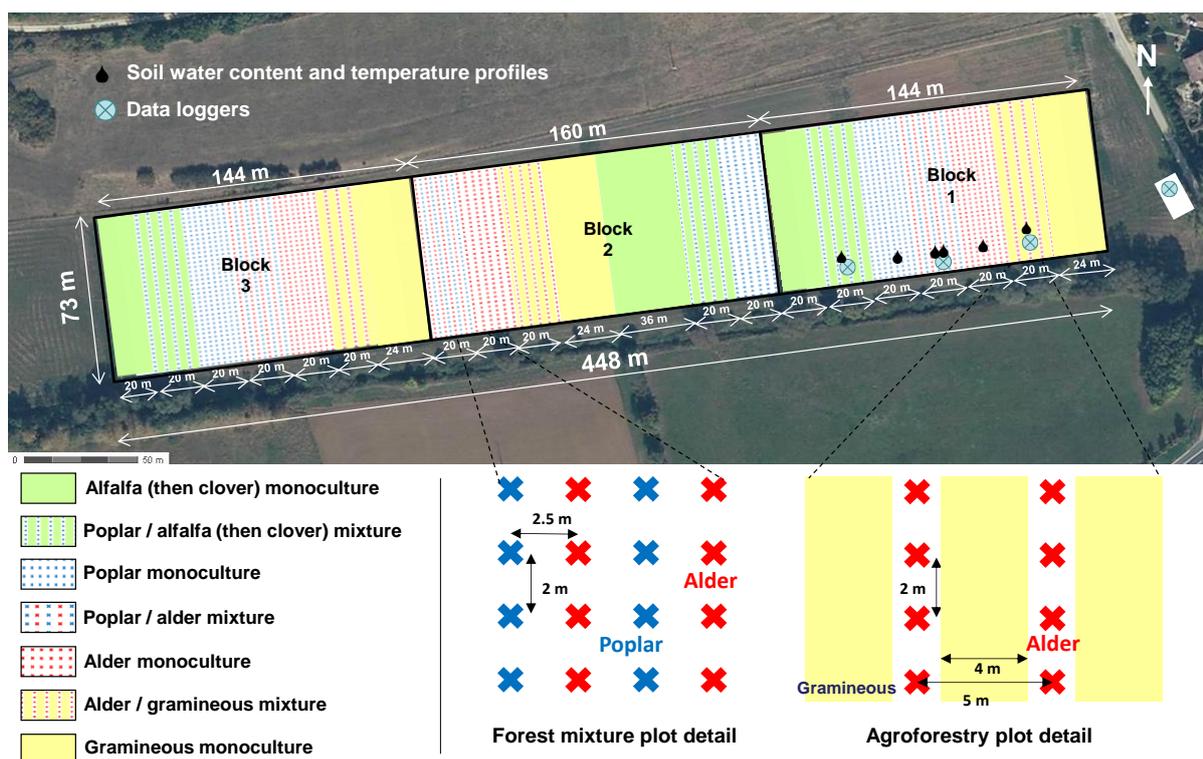


Figure 2. Représentation schématique du site Pilote de la Bouzule. Les dimensions des parcelles et les positions des sondes d'humidité du sol et des centrales d'acquisition sont indiquées. Un focus sur le mélange forestier et les parcelles agroforestières est aussi présenté avec les espacements entre arbres et cultures.

Les rendements et la qualité des cultures, associées ou non aux arbres, ont été mesurés tous les ans via des récoltes de biomasse réalisées dans des quadrats dans les différents traitements (3 quadrats par traitement et par bloc). La productivité des arbres a été estimée à l'aide de suivi de leurs dimensions (hauteur totale et DBH = diamètre à 1,30 m) une fois par mois pendant la saison de végétation sur une sélection de 10% des arbres et pour l'ensemble des arbres une fois par an (inventaire de fin d'année). Afin d'estimer l'impact de l'association des arbres avec des cultures agricoles (fixatrice d'azote ou pas), une batterie de déterminants fonctionnels, phénologiques et architecturaux de la productivité des arbres a été estimée dans le cadre de la thèse de doctorat d'Anaïs Thomas (co-encadrement par Pierrick Priault et Nicolas Marron) : efficacités d'utilisation de l'eau et de l'azote (aux échelles de la feuille à l'arbre), durée de la saison de végétation, morphologie des houppiers, etc.

2.2.1.2. Premier cercle de sites

Les sites du premier cercle ont été instrumentés pour pouvoir suivre dans le temps les teneurs en eau du sol. Des tubes permettant l'insertion d'une sonde PR2 pour réaliser des mesures ponctuelles à six profondeurs (10, 20, 30, 40, 60 et 100 cm) ont été enfoncés dans le sol en 2018, sur la ligne d'arbre pour ne pas gêner les travaux dans la culture, à quatre distances d'un arbre représentatif de la parcelle : 50 (pied de l'arbre), 100 (limite de houppier), 200 (quart de distance entre deux arbres) et 400 cm (mi-distance entre deux arbres et position où l'arbre est supposé ne plus avoir d'influence sur la teneur en eau du sol). Des relevés mensuels sont réalisés depuis 2018 ou 2019 selon les sites (excepté au site de Banogne). Les mesures réalisées avec la sonde PR2 sont répétées dans trois directions dans le sol en pivotant la sonde d'un tiers de tour ; ces trois mesures prospectant des zones de sol distinctes, sont les répétitions. Pour chaque profondeur, distance à l'arbre et site, des vitesses d'assèchement du sol au printemps et de ré-engorgement à l'automne ont été calculées comme la pente de la régression linéaire entre la teneur en eau du sol et le temps au cours du printemps et de l'automne de chaque année (en pourcentage d'évolution de l'humidité par jour) ; pour simplifier l'interprétation des données, seuls les résultats correspondant aux profondeurs (10 cm vs. 1 m) et distances à l'arbre (pied vs. mi-distance) extrêmes sont présentés par la suite. En 2022, l'instrumentation a été complétée à l'aide de sondes d'humidité du sol WaterMark et de stations météo positionnées dans la culture dans le cadre du projet FR-eau-MAGE (Figurer la Ressource en eau et le Microclimat des parcelles agroforestières du Grand-Est) financé par l'OFB (Figure 3).

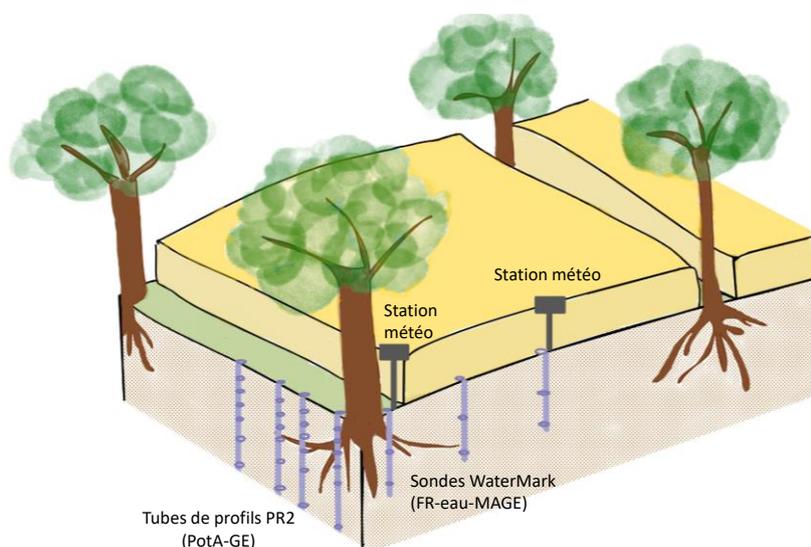


Figure 3. Disposition des équipements de mesure de microclimat et de l'humidité du sol sur la ligne d'arbre et dans le champ sur les parcelles du réseau PotA-GE / FR-eau-MAGE.

Les sites ont été caractérisés en termes de texture et de densités apparentes des sols jusqu'à 60 cm de profondeur (prélèvements à la carotteuse manuelle à manivelle des horizons suivants : 0-5, 5-10, 10-15, 15-30, 30-45 et 45-60 cm entre 2018 et 2021 et analyse des textures au laboratoire de Arras). La densité apparente (en $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$) a été calculée comme la masse sèche (en g) de la terre divisée par le volume (en cm^3) de terre prélevée.

Les dimensions (hauteurs totales et DBH) de 12 arbres par espèce et par site ont été mesurées au cours des étés 2020 et 2021. Des échantillonnages de biomasse herbacée ainsi que des déterminations botaniques ont été réalisés dans des quadrats de 50x50 cm aux quatre mêmes distances des arbres (50, 100, 200 et 400 cm) pour quatre arbres par site (16 quadrats par site) au printemps 2021. Les échantillons prélevés ont été séchés à 50°C pendant une semaine puis pesés pour estimer leur biomasse sèche. Les données météorologiques, notamment les précipitations, sont issues des stations météorologiques INRAE ou Météo France les plus proches des sites.

2.2.2. Estimation de l'effet de l'introduction des arbres sur le fonctionnement des sols – Évolution de l'abondance des communautés microbiennes, des pools de matières organiques et processus de décomposition/minéralisation des matières organiques

2.2.2.1. Protocole d'échantillonnage sur le site Pilote

Nous avons cherché à caractériser sur le site Pilote :

(i) l'évolution temporelle de la structure des communautés microbiennes en lien avec des changements de paramètres physico-chimiques sur les différentes modalités agricoles et agroforestières (mélanges aulne-poacées et peuplier-fabacées, et leurs équivalents en pur) depuis 2014. Des échantillons de sol ont été prélevés, à différentes dates (2014, 2015, 2016, 2018, 2022) selon une grille spatialisée fixe. Différentes variables physico-chimiques ont été mesurées et le reste des sols a été congelé en attente d'analyses moléculaires. Les caractéristiques taxonomiques des communautés microbiennes ont été appréhendées par des outils moléculaires permettant d'accéder à l'abondance des bactéries et des champignons (qPCR 16S et ITS) ainsi qu'à leur diversité (métabarcoding 16S, ITS).

(ii) l'évolution spatiale sur la campagne 2022 des différentes variables physico-chimiques et microbiennes du sol de la parcelle agroforestière aulnes-poacées en comparaison du témoin agricole poacées, à trois dates différentes, permettant de prendre en compte la phénologie de l'arbre (débourrement, pleine feuillaison, chute des feuilles). L'analyse spatio-temporelle se base sur un schéma d'échantillonnage (de carottes de sol) dense (60 points de prélèvement sur 40 m² d'une parcelle aulnes-poacées et sur une parcelle poacées seules), avec pour analyses, les différentes variables précédemment citées. Les variables sont traitées par krigeage, afin de produire une carte représentative de l'évolution de chaque variable selon son positionnement spatial et de visualiser l'impact potentiel de la présence de l'arbre et de sa phénologie sur chacune des variables par comparaison des cartes obtenues entre la modalité agroforestière et la modalité agricole.

2.2.2.2. Protocole d'échantillonnage sur les sites du 1^{er} cercle

Chaque année entre 2019 et 2022, des échantillonnages de sols ont été réalisés sur l'horizon de surface (0-15 cm) à des distances croissantes de l'arbre à la fois dans la ligne d'arbre et dans la parcelle cultivée. Dans l'ensemble des systèmes que nous avons étudié, les rangées d'arbres présentent au pied une végétation le plus souvent spontanée, de diversité taxonomique différente plus ou moins gérée mécaniquement ou chimiquement par les exploitants. Cette zone de végétation herbacée correspond au linéaire sous arborée ou LSA qui sont à l'interface avec la culture. Ces LSA n'existent que dans les systèmes d'agroforesteries en systèmes intra-parcellaires linéaires en zone tempérée (Torralba et al. 2016). Il s'agit d'une zone non exploitée par l'agriculteur mais qui peut représenter une source de diversité importante dans les systèmes agroforestiers dans le sens où elle n'est pas travaillée par l'agriculteur et qu'elle peut constituer un refuge pour les organismes du sol. De plus, elles pourraient jouer un rôle particulièrement important dans l'apport de matière organique dans les premiers centimètres du sol (D'Hervilly 2017). Pour mesurer l'influence des arbres sur le sol entre les rangées d'arbres, un échantillonnage du sol dans la parcelle de culture a été effectué selon le gradient de distance suivant (Figure 4) :

- 1 : Au pied de l'arbre (noté P)
- 2 : À mi-distance du houppier de l'arbre (noté H/2)
- 3 : À distance du houppier de l'arbre (noté H)
- 4 : À 1,5 fois la distance du houppier de l'arbre (noté H+H/2)
- 5 : Au centre de la parcelle (noté M)

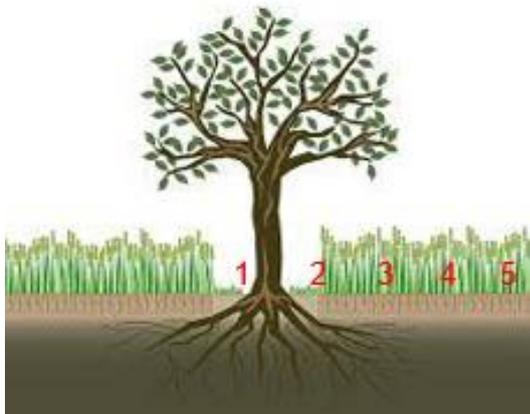


Figure 4. Distance de prélèvement du sol dans la parcelle cultivée. Source de la photographie : https://www.agroforesterie.ch/wp-content/uploads/Baum_tiefWurzel.jpg

Trois carottes de sol sont réalisées par distance, pour un total de 15 échantillons par parcelles. Le centre de la parcelle correspond au témoin agricole dans le sens où à cette distance les effets de l'arbre ne sont plus significatifs. Pour quantifier l'effet de l'arbre sur les variables microbiennes le long du LSA, un échantillonnage du sol a été réalisé selon quatre zones correspondant à la localisation de quatre tubes mis en place dans le LSA pour les mesures d'humidité du sol par sonde PR2 (cf. ci-avant). Ces sondes sont à des distances à l'arbre différentes pour chaque site. La sonde 4 est située à mi-distance entre deux arbres sur la rangée. Ces distances sont résumées dans le tableau 1 :

Tableau 1. Distance à l'arbre des sondes dans le LSA des différents sites.

	Montenoy	Pixérécourt	Orbigny	Quincey	Hennecourt	Banogne
Sonde 1	50 cm	50 cm	50 cm	50 cm	50 cm	50 cm
Sonde 2	100 cm	129 cm	150 cm	100 cm	100 cm	100 cm
Sonde 3	200 cm	200 cm	250 cm	150 cm	255 cm	150 cm
Sonde 4	400 cm	400 cm	500 cm	300 cm	510 cm	300 cm

Trois réplicas sont réalisés par position, pour un total de 12 échantillons. Après prélèvement, les différents échantillons de sol (27 échantillons au total) ont été tamisés à 5 mm puis stockés à 4°C en attendant d'effectuer les mesures des différentes variables en lien avec le fonctionnement microbien des sols.

2.2.2.3. Variables mesurées

Nous avons tenté d'évaluer les effets de l'introduction de l'arbre sur l'abondance microbienne, le fonctionnement microbien en lien avec la minéralisation des matières organiques des sols ainsi que sur les pools de C labile et d'azote labile et les teneurs en nitrates et ammonium. Les communautés microbiennes du sol sont des acteurs majeurs du fonctionnement des sols et notamment des processus de minéralisation-immobilisation qui conditionnent la biodisponibilité en éléments minéraux pour la croissance des plantes. La quantification de l'abondance de ces communautés peut être appréhendée au travers de différentes mesures (biomasse microbienne, biomasse moléculaire, nombre de copies 16S, ITS, etc.). Les méthodes utilisées pour la détermination de la taille du compartiment microbien ont été respectivement :

- la fumigation-extraction (Vance et al. 1987) qui permet de déterminer le carbone organique et l'azote extractible suite à un traitement biocide avec des vapeurs de chloroforme pendant 16 heures. La détermination des quantités de carbone et d'azote totales extractibles présentes dans les échantillons de sol, est effectuée par passage à l'analyseur TOC (Carbone Organique Total) et TN (Azote Total),
- la quantification de l'ADNr 16S (bactéries) et de l'ITS (champignons) par PCR quantitative selon le protocole décrit dans Clivot et al. 2019).

Du fait de leur caractère hétérotrophe, les communautés microbiennes du sol ont besoin de sources de carbone et d'énergie disponibles dans la solution du sol pour assurer leur métabolisme. La teneur en C extractible à l'eau chaude est une mesure qui est fortement corrélée au carbone microbien (Sparling et al. 1998). Le passage à haute température permet le passage en solution des matières organiques solubles carbonées et azotées labiles (Strosser 2010), potentiellement disponibles pour le métabolisme microbien.

Les micro-organismes tels que les bactéries et les champignons sont capables d'obtenir du carbone et des nutriments à partir de composés organiques complexes, grâce à la production d'enzymes extracellulaires. Le type d'enzymes et la nature des enzymes (en termes de spécificité de substrats) synthétisées dépendent de l'activité des communautés microbiennes des sols (Gianfreda et Ruggiero 2006, Sinsabaugh et al. 2008). La mesure de l'activité de ces enzymes extracellulaires en lien avec les cycles biogéochimiques peut constituer un indicateur pour évaluer la fertilité des sols et plus largement la qualité biologique des sols ainsi que les effets des activités anthropiques (changement d'usages des terres, pratiques agricoles, etc.) sur le fonctionnement des sols (Bandick and Dick 1999, Zhang et al. 2015). Nous avons mesuré différentes enzymes impliquées dans les différents cycles de nutriments par fluorimétrie (Clivot et al. 2019) et les teneurs en éléments minéraux du sol ont été mesurées après extraction au phosphate de mono-potassium (KH_2PO_4) à 0,016 M et dosage en chromatographie ionique (Niknahad-Gharmakher et al. 2012) (Figure 5).

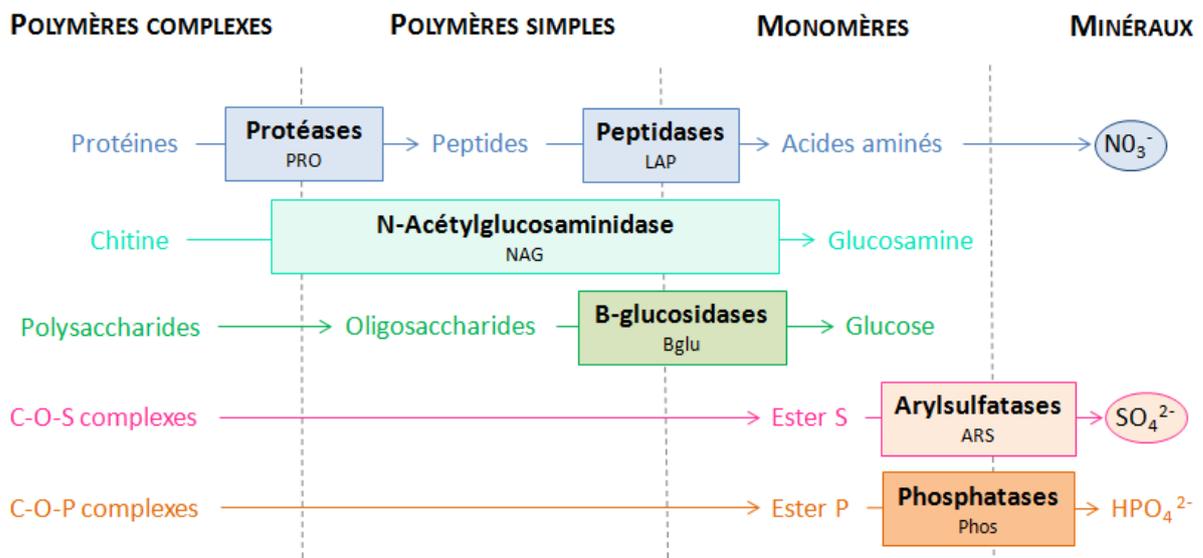


Figure 5. Schéma récapitulatif de la dégradation des principaux composés organiques du sol et des enzymes impliquées en lien avec les cycles du carbone (en vert), de l'azote (en bleu), du soufre (en rose) et du phosphore (en orange).

2.2.3. Estimation de l'effet de l'introduction des arbres en termes de bilan environnemental : bilans de gaz à effet de serre (GES) et stocks de carbone des sols

2.2.3.1. Bilans de gaz à effet de serre

Les mesures de gaz à effet de serre ont été effectuées sur le site Pilote de mars 2021 à mars 2022. Les flux nets de CH₄ et N₂O sur sol nu ont été mesurés à l'aide d'un analyseur de gaz (N₂O, CH₄ et H₂O de chez AP2E). L'analyseur est relié aux quarante-deux chambres de dimensions 20 cm × 20 cm × 20 cm en PVC, fixées sur des embases préalablement enfoncées dans le sol. Six chambres sont réparties sur les sept traitements (Figure 2) : deux agricoles (trèfle pur, prairie), deux agroforestiers (mélanges trèfle/peuplier et prairie/aulne) et trois forestiers (peuplier pur, aulne pur et mélange aulne/peuplier). Après la fermeture automatique de la chambre, l'analyseur mesure en continu toutes les secondes les concentrations de méthane, de dioxyde de carbone, de vapeur d'eau ainsi que la température et la pression. La durée de mesure pour une chambre est de quinze minutes ce qui correspond à un cycle de dix heures trente pour mesurer les quarante-deux chambres, soit une mesure par traitement toute les heures et quarante-cinq minutes. L'air circule en circuit fermé entre la chambre fermée et l'analyseur. Des électrovannes permettent de mesurer une chambre après l'autre. Des sondes (CS655, Campbell, broches de 12 cm) permettant de mesurer l'humidité et la température du sol des dix premiers centimètres de sol ont été couplées à chaque chambre de mesure.

2.2.3.2. Stocks de carbone des sols

Des prélèvements de sol ont été réalisés aux sites du premier cercle entre les étés 2018 et 2021 selon la grille de prélèvements utilisée par Cardinael et al. (2017) légèrement adaptée : quatre distances de l'arbre 50 (pied de l'arbre), 100 (limite de houppier), 200 (quart de distance entre deux arbres) et 400 cm (mi-distance entre deux arbres et position où l'arbre est supposé ne plus avoir d'influence sur la teneur en carbone du sol). Les prélèvements ont été effectués pour trois transects (deux dans la culture et un sur la ligne d'arbres) et pour les horizons suivants : 0-5, 5-10, 10-15, 15-30, 30-45 et 45-60 cm. Les sols prélevés ont été tamisés, séchés à 40°C jusqu'à atteinte d'une masse stable puis broyés au broyeur à anneau. Ils ont été décarbonatés par fumigation à l'acide chlorhydrique, micro-pesés (30 ± 5 mg) et leurs teneurs en carbone ont été déterminées en analyse élémentaire par la plateforme SilvaTech (INRAE Grand-Est). La masse de Carbone Organique du Sol (M_{cos} en Mg C.ha⁻¹) dans chaque horizon a été calculée comme suit :

$$M_{cos} = [C] \times \rho_b \times T_c \times 10^4 \text{ m}^2 \cdot \text{ha}^{-1} \times 10^{-3} \text{ Mg} \cdot \text{kg}^{-1}$$

avec [C] la concentration élémentaire en carbone du sol (kg.Mg⁻¹) ; ρ_b la densité apparente (en Mg.m⁻³) ; et T_c l'épaisseur de sol (en m) qui vaut 0.05 m ou 0.15 m (Bambrick et al. 2010). À Pixérécourt, les échantillons les plus profonds de la parcelle n°2 n'ont pas pu être décarbonatés de manière satisfaisante en raison de leurs teneurs très importantes en carbonates et sur la parcelle n°1, les prélèvements n'ont pas pu être réalisés au-dessous de 45 cm de profondeur en raison de la présence de cailloux ; pour ces deux parcelles les stocks de carbone organique pour l'ensemble du profil de sol (0-60 cm) n'ont donc pas pu être établis. Aucune différence significative n'a été détectée entre les transects réalisés sur la ligne d'arbre et dans la culture ; ils ont donc été considérés comme des répétitions. Les données ont été analysées statistiquement à l'aide d'ANOVA à trois facteurs (site, distance à l'arbre, profondeur).

2.3. Évaluation multicritère des potentialités des plantations agroforestières dans le Grand-Est (indicateurs socioéconomiques)

Les résultats présentés ci-après sont issus d'une enquête réalisée en amont du plan de relance « Plantons des haies » lancé début 2021. Les personnes qui ont répondu sont donc pour la plupart intéressées par l'arbre. De plus, même si cette enquête a été largement diffusée, elle a pu ne pas toucher la totalité des agriculteurs de la région Grand-Est. Malgré ces limites, ce sont près de 300 agriculteurs qui ont répondu à cette enquête. L'enquête visait aussi les conseillers et accompagnateurs des agriculteurs : sur ce public, les réponses sont moins nombreuses et ne seront pas exploitées. L'enquête avait déjà été testée sur un petit échantillon d'agriculteurs, elle a été ensuite amendée par des échanges avec les membres du projet PotA-GE. Elle a été construite selon deux axes principaux :

- Le passé des arbres sur l'exploitation : ont-ils progressé, régressé... et les raisons de ce passé ?
- Le futur des arbres sur l'exploitation : vont-ils progresser, pour quelles raisons et quelles sont les limitations ?

L'envoi de l'enquête a ensuite été fait par les conseillers des chambres dans chaque département. Notamment, dans l'Aube et la Haute-Marne, l'envoi a été réalisé au travers d'une mailing liste de respectivement 1500 et 2300 correspondants. Le taux de lecture y est malheureusement bas (20%) d'où une faible conversion en réponse. Dans les Ardennes, l'envoi a été plus restreint et a visé des agriculteurs déjà connus, avec dans ce cas-là une dominante d'agriculteurs biologiques. Les réponses sont réparties sur l'ensemble de la région avec une moindre réponse dans certains départements (Figure 5 présentant le nombre de réponse par commune de la région).

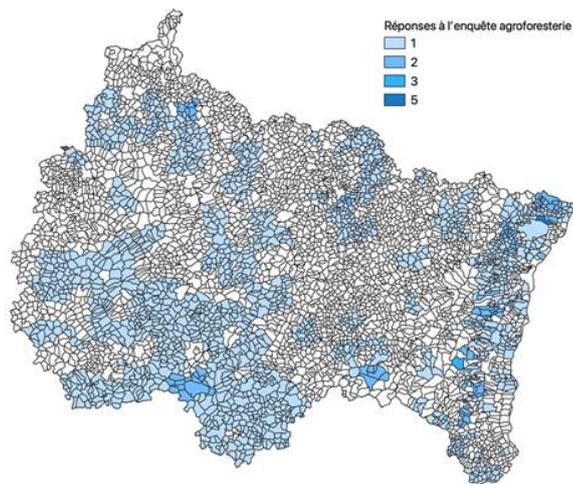


Figure 6. Répartition des réponses à l'enquête, par commune de la région Grand-Est.

Les profils des répondants sont assez diversifiés, cependant plusieurs groupes sont surreprésentés par rapport à leur présence dans le Grand-Est (Figure 7). Les élevages avicoles très intéressés par la démarche ont fortement répondu. Du fait de la localisation des réponses, la vigne est fortement représentée. En comparaison, les grandes cultures sont sous-représentées, ne représentant qu'un peu plus d'un quart des réponses. L'orientation des exploitations répondantes est très marquée par l'agriculture biologique (plus de 40%). De même, l'agriculture de conservation est légèrement surreprésentée (10%). De manière surprenante, les exploitations « labels » sont peu répondantes. Il s'agit d'un manque dans nos réponses.

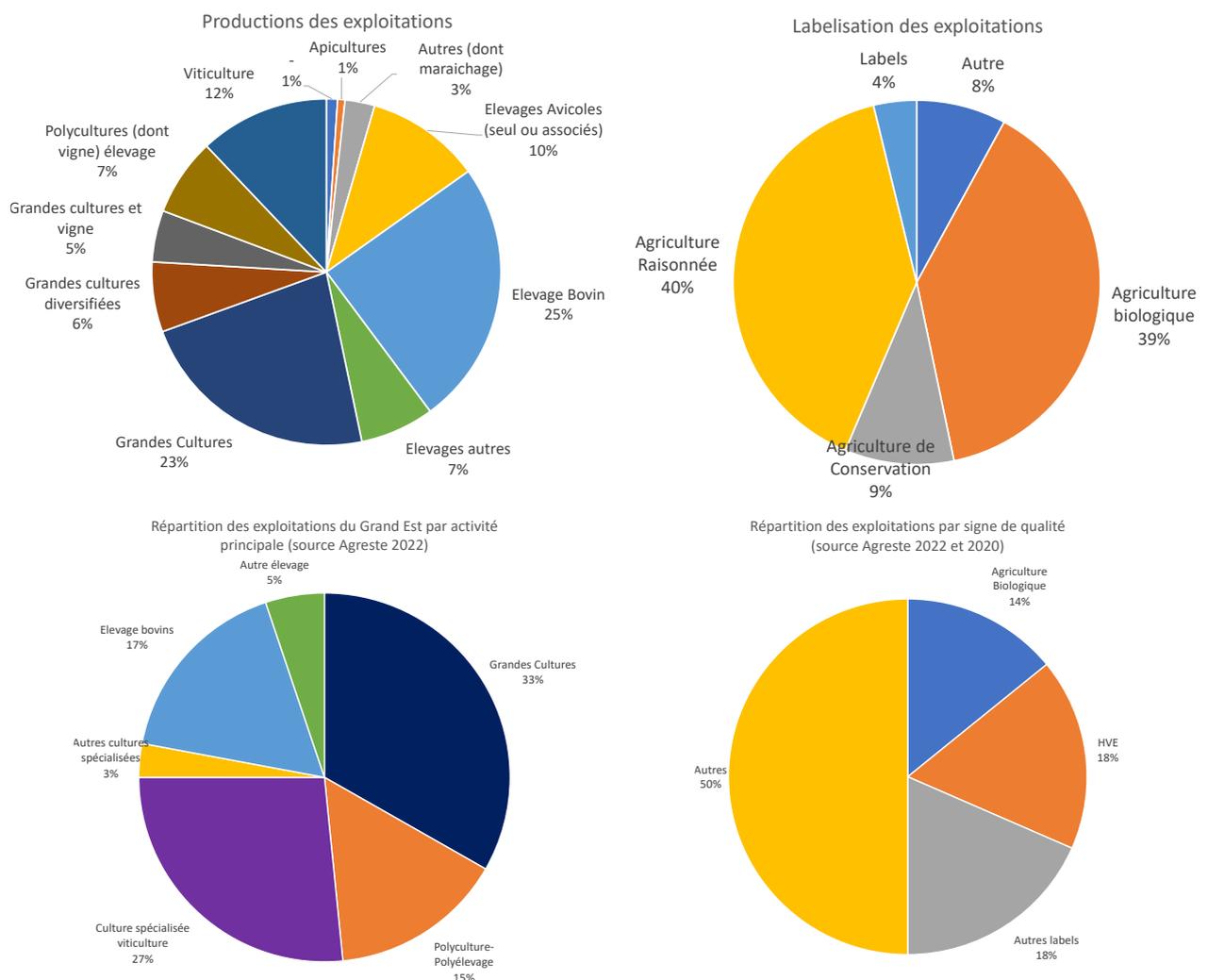


Figure 7. Typologie des exploitations des répondants à l'enquête (productions et labélisations) en haut et typologie globale des exploitations du Grand-Est en bas.

Les exploitations répondantes sont une large majorité avec une présence d'arbres sur l'exploitation. Ces arbres sont très diversifiés, rarement d'un seul type (haies, arbres isolés, vergers, etc.). Des arbres intra-parcellaires sont indiqués par les répondants de manière plus importante que ce qui a été recensé dans le cadre du projet. Les surfaces plantées ont été estimées dans le cadre du questionnaire et par des informations complémentaires collectées par des conseillers agricoles. Le tableau 2 ci-dessous représente l'agrégation de ces deux sources d'information. Il est important de noter que ces réponses minimisent fortement la présence de parcelles agroforestières en Lorraine où le taux de réponse à l'enquête était relativement faible (cf. Figure 6).

Tableau 2. Surfaces plantées en agroforesterie (intra-parcellaire et haies) dans le Grand-Est estimées sur la base des réponses aux enquêtes.

	Nombre de réponses	Somme Agroforesterie (en ha)	Somme Haie (en mètre linéaire)	Ancienne région (nombre de réponses)	Somme Agroforesterie (en ha)	Somme Haie (en mètre linéaire)			
Aube	40	443	39886	136	1549	142107			
Ardennes	9	159	6980						
Marne	13	424	40615						
Haute-Marne	74	523	54626						
Meurthe et Moselle	3	0	2600				43	184	62860
Meuse	10	70	34450						
Moselle	17	68	21810						
Vosges	13	46	4000						
Bas Rhin	24	26	2200				125	240	25253
Haut Rhin	101	214	23053						
Totaux	304	1973	230220	= 230 km					

2.4. Développement des modules biophysiques agroforestiers dans la plateforme de simulation MAELIA et évaluation de scénarios de déploiement de systèmes agroforestiers sur différents territoires

2.4.1. Intégration des modules de dynamiques et d'interactions arbre, culture et sol dans MAELIA

Le modèle Yield-SAFE (Van der Werf et al. 2007), développé dans le cadre des projets de recherche européens SAFE « Silvoarable Agroforestry for Europe » (2001-2005) puis AGFORWARD (2014-2017) a été identifié comme présentant un bon compromis entre simplicité des formalismes et robustesse pour être intégré dans la plateforme MAELIA (Therond et al. 2014). Yield-SAFE permet de simuler, au pas de temps journalier, la croissance des arbres et des cultures herbacées et l'eau du sol. Les formalismes de Yield-SAFE ont été codés dans MAELIA à travers l'environnement de développement de simulation et modélisation GAMA (Taillandier et al. 2019). Cette intégration a nécessité i) la création de trois modèles de dynamiques de culture ('*cultureYieldSafe*'), d'arbre ('*treeYieldSafe*') et du sol de la parcelle agroforestière simulée ('*parcelleYieldSafe*') et de fichiers de sorties spécifiques, ii) l'ajout et la modification de fichiers d'entrées de MAELIA relatifs aux paramètres des cultures et des arbres et aux parcelles, et iii) l'extension de modèles existants pour intégrer ou calculer les nouveaux paramètres ou variables spécifiques à Yield-SAFE (Figure 8).

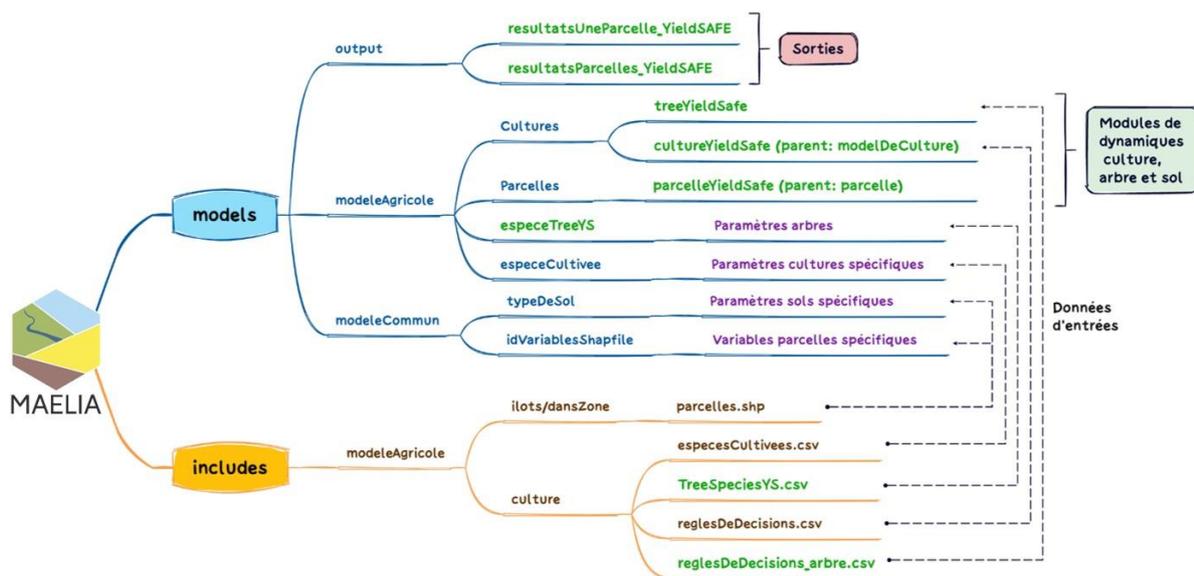


Figure 8. Intégration du modèle biophysique agroforestier Yield-SAFE dans MAELIA. Les nouveaux modèles (models), fichiers d'entrées (includes) et de sorties (output) sont représentés en vert, les autres modèles et fichiers présentés ont été étendus pour inclure ou calculer de nouveaux paramètres ou variables d'entrées spécifiques à Yield-SAFE.

2.4.2. Évaluation du modèle agroforestier et ajustement de paramètres

2.4.2.1. Compilation de données arbres et cultures pour évaluer les modules de croissance

Les biomasses aériennes des essences d'arbres des sites du premier cercle ont été estimées à partir de mesures de diamètre des arbres et de fonctions allométriques (méthode décrite dans Jenkins et al. 2003). Pour les peupliers suivis sur le site Pilote de la Bouzule, une fonction spécifique à cette essence a été utilisée pour estimer la biomasse ligneuse à partir de mesures du diamètre et de la hauteur des arbres (Marron et al. 2018). Concernant les cultures, peu de données étant disponibles pour les sites suivis, des données de statistiques agricoles au niveau départemental (AGRESTE) ont été compilées pour les comparer par la suite aux rendements simulés. Des estimations à dire d'experts de rendements de cultures dans des conditions optimales non limitantes pour différents territoires du Nord-Est de la France ont également été utilisées, ces valeurs ayant notamment servies à paramétrer le modèle sol-plante de MAELIA (i.e. AqYield, Constantin et al., 2015).

2.4.2.2. Comparaison des biomasses simulées avec des données mesurées/estimées avec les paramétrages par défaut du modèle et après ajustements

Des simulations de systèmes de grandes cultures (Tableau 3) avec et sans introduction d'arbres ont été réalisées pour comparer la production de biomasse des arbres et les rendements des cultures avec les données compilées dans la partie 2.4.2.1. En première approche, les simulations ont été réalisées avec les paramétrages par défaut donnés dans les publications relatives au modèle Yield-SAFE ou associés à l'application web du modèle (WebYieldSafe). Lorsque les paramétrages par défaut ne donnaient pas des résultats satisfaisants, des ajustements de paramètres ont été réalisés pour reproduire au mieux les données mesurées ou estimées. Des valeurs de paramètres issues du modèle sol-plante AqYield de MAELIA ont été intégrées (pour la phénologie des cultures) et des valeurs issues de la littérature ont été testées par méthode d'essai-erreur. Les paramétrages initiaux et retenus après ajustement sont détaillés en annexe 1. Ces comparaisons simulations vs données d'observation (pour les rendements des cultures) ou estimées (pour les biomasses d'arbres) ont été réalisées avec deux options de paramétrage du modèle : i) sans prendre en compte les effets de l'eau sur la croissance des cultures afin de simuler des rendements optimaux potentiellement atteignables en conditions non limitantes en eau (vs. données de rendements potentiels à dire d'experts), et ii) en prenant en compte les effets de la limitation en eau sur la croissance des arbres et cultures (vs données estimées ou observées).

2.4.3. Scénarios de déploiement de systèmes agroforestiers dans différents territoires du Nord-Est de la France

Les paramétrages définis précédemment (partie 2.4.2.2) ont ensuite été utilisés pour réaliser différents scénarios. Des scénarios de déploiement de systèmes agroforestiers ont ainsi été simulés avec MAELIA dans des parcelles représentatives de trois territoires contrastés en termes de pédoclimats du Nord-Est de la France et de systèmes de culture : deux dans la région Grand-Est (un territoire du Haut-Rhin en Alsace et un territoire de la Meuse en Lorraine) et un plus à l'ouest, en région Ile de France (plaine de Versailles dans les Yvelines). Des scénarios avec et sans introduction d'arbres (deux essences : peuplier et merisier) ont été simulés et ce, pour deux systèmes de cultures par territoire (Tableau 3). Les différents systèmes ont été simulés sur une période de 25 ans (de 2020 à 2044) en utilisant un scénario d'évolution du climat RCP 4.5.

Tableau 3. Cultures, espèces d'arbres, texture des sols et variables climatiques moyennes (projection RCP 4.5 2020-2044) pour les systèmes simulés sur les parcelles de trois territoires.

Territoire (code)	Système de culture 1	Système de culture 2	Arbre 1	Arbre 2	Texture du sol	Température moyenne	Précipitations annuelles
Meuse (55)	Colza-Blé-Orge	Colza-Blé-Maïs fourrage-Blé	Peuplier	Merisier	Fine	10,7 °C	1011 mm
Haut-Rhin (68)	Maïs grain	Blé-Maïs grain	Peuplier	Merisier	Moyenne	11,0 °C	748 mm
Yvelines (78)	Colza-Blé-Orge	Blé-Maïs grain	Peuplier	Merisier	Moyenne Fine	11,7 °C	887 mm

Le rapport de surface équivalente ou *Land Equivalent Ratio* (LER, Mead and Willey 1980) a été utilisé pour évaluer si les associations simulées par le modèle dans les systèmes agroforestiers permettraient de produire des rendements et biomasses d'arbres supérieurs à des cultures pures sur une surface équivalente. Cette surface relative a été calculée comme suit :

$$LER = \frac{\text{Rendements}_{\text{cultures associées}}}{\text{Rendements}_{\text{cultures seules}}} + \frac{\text{Volumes de bois}_{\text{arbres associés (50/ha)}}}{\text{Volumes de bois}_{\text{arbres seuls (200/ha)}}$$

Le calcul du LER a été réalisé en simulant sur les mêmes parcelles (même type de sol et climat) des systèmes en agroforesterie associant culture et arbres (avec une densité de 50 arbres/ha = valeur proche de la moyenne observée des pratiques sur les sites du premier cercle), en cultures pures et en forêts (densité de 200 arbres/ha). Les rendements des cultures ont été calculés à partir des biomasses simulées grâce à des indices de récolte spécifiques, puis les rendements des différentes cultures ont été convertis en énergie pour être additionnés (Villalobos et al. 2016). Pour les arbres, les biomasses produites ont été converties en volumes de bois exploitable à l'aide de paramètres espèce-spécifiques (Van der Werf et al. 2007).

3. Bilan / Principaux résultats obtenus

3.1. État des lieux des plantations agroforestières dans le Grand-Est

3.1.1. Recensement des plantations agroforestières à l'échelle régionale

3.1.1.1. Enquêtes et genèse de la base de données

La réalisation de l'état des lieux de l'Agroforesterie en Grand-Est a débuté par la réalisation d'un inventaire des plantations agroforestières en « alignements d'arbres en intra-parcellaire ». Ce travail a été réalisé par la CDA88 et la CDA10 en support, et avec l'aide de l'ensemble des acteurs du territoire impliqué, en particulier les Chambres Départementales d'Agriculture. La première étape a été de répertorier toutes les plantations réalisées en Grand-Est depuis 2007, date d'entrée de l'Agroforesterie dans la PAC (politique agricole commune). Ainsi, une base de données très dense a été générée puisque ce premier travail n'était pas discriminant quant aux types d'agroforesteries et aux types de formations arborées implantées. Un travail de « sélection » a ensuite été réalisé afin d'extraire et d'affiner les données sur les critères attendus à savoir les plantations d'alignements d'arbres intra-parcellaires. Pour chacun des sites, les informations relevées lors des enquêtes ont été définies suite au travail concerté avec les étudiants de l'ENSAIA et en collaboration avec les acteurs du projet PotA-GE, puis affiné lors du dépouillement. La caractérisation des parcelles est réalisée selon 23 critères regroupés en trois catégories :

- Caractérisation de l'exploitation ;
- Caractérisation des projets de plantation ;
- Description des parcelles et des plantations (Figure 9).

La base de données est présentée en annexe 2. Les monographies sont présentées en annexe 3.

CARACTERISATION DE L'EXPLOITATION					
Nom de l'exploitation	SAU totale (ha)	Exploitation en AB	Atelier principal de l'exploitation	Commune parcelle	Production primaire de la parcelle
-	-	OUI	Elevage Bovin Lait	-	Prairie Permanente
			Elevage Bovin Viande		
			Elevage Equin		
			Elevage Avicole		
		NON	Elevage Caprin		Parcours à Volailles
			Elevage Ovin		
			Elevage Porcin		
			Marâchage		
			Grandes Cultures		Maraîchage

CARACTERISATION DU PROJET DE PLANTATION						
Année de plantation	Objectifs services	Objectifs productions	Acteurs qui ont participé au projet	Type de formations arborées	Emplacement	Surface de la parcelle en ha
2007 - - 2022	Agronomie	Bois d'Œuvre	-	Alignement d'arbre	Intraparcellaire	-
	Zootechne	Bois énergie / paillage				
	Biodiversité	Petits fruits / Fruits à coques				
	Paysage	Mixte				
	Autre	Autre				

DESCRIPTION DE LA PARCELLE ET DE LA PLANTATION						
Type de sol	Ambiance physico-chimique	Profondeur	Hydromorphie	Type d'essences	Mètres linéaires	Arbres/ha
-	-	-	OUI	-	-	-
			NON			
Département	Nom département	Site expérimental Suivi scientifique				
		OUI				
		NON				

Figure 9. Structuration de la base de données selon 23 critères descriptifs des plantations agroforestières du Grand-Est.

3.1.1.2. Caractérisation des sites répertoriés en Grand-Est

Entre janvier 2018 et décembre 2021, 72 parcelles ont été répertoriées, et les informations ont été collectées, nous permettant de décrire les systèmes en place dans la région Grand-Est. La dynamique de développement de l'agroforesterie est caractérisée par deux « vagues » sur la période 2007/2021 (Figure 10) :

- La première « vague » de plantation intervient entre 2012 et 2014. Les agriculteurs planteurs étaient alors demandeurs d'informations et d'accompagnement technique et cette vague est directement en lien avec les actions d'informations et de formations proposées par les acteurs techniques du territoire. Une partie de cette vague est liée à l'aide agroforesterie (mesure 222) qui avait été ouverte pour l'ancienne région Champagne-Ardenne. Cette aide n'a pas été reprise lors de la fusion des régions.
- La seconde « vague » de plantation intervient entre 2017 et aujourd'hui. Les actions de sensibilisation et d'accompagnement ont été poursuivies. De plus, dès 2016/2017, des aides à l'investissement pour la plantation ont été mises en place sur certains territoires (AMI Trame Verte et Bleue sur des territoires à enjeux AERM ; développement de dispositifs d'aides par certains conseils départementaux, etc.) principalement dans les départements Lorrains.

Plus récemment, mais cela n'est pas encore pris en compte dans cet inventaire, le déploiement du Plan de relance « Plantons des haies » renforcera la dynamique de plantation dès 2021 et jusqu'en 2024 au moins. Le pic de plantation ci-dessous en 2021 s'explique par le déploiement de dispositifs locaux comme le dispositif « Osez l'agroforesterie » dans le département des Vosges ou d'autres plantations ponctuelles à l'échelle de la région. Les résultats du Plan de relance ne devraient être visibles qu'à partir de 2023.

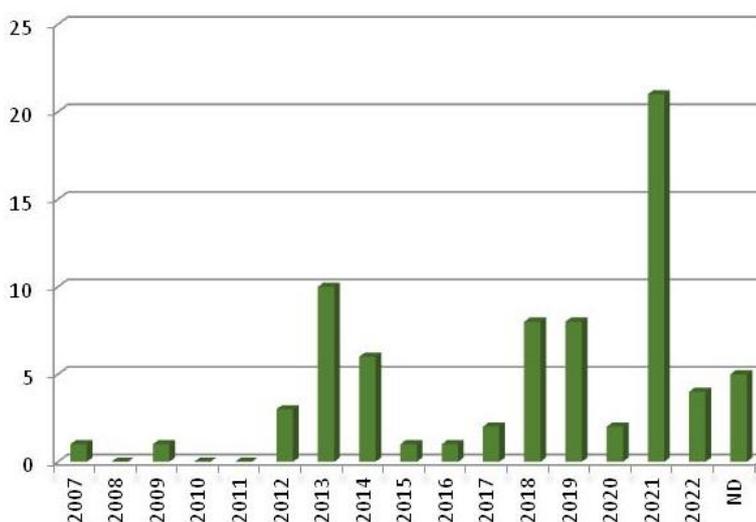


Figure 10. Nombre de parcelles en agroforesterie intra-parcellaire implantées par années depuis 2007 en région Grand-Est.

3.1.1.2.1. Caractérisation des exploitations pratiquant l'agroforesterie intra-parcellaire

L'agroforesterie caractérisée par les « alignements d'arbres en intra-parcellaire » est principalement liée aux ateliers d'élevages en Alsace et Lorraine. En Champagne-Ardenne, les grandes cultures dominent. Sur notre échantillon, 74 % des exploitations ont pour atelier dominant l'élevage (Figure 11). L'implantation d'arbres en intra-parcellaire en grandes cultures ne concerne que 18% de l'échantillon et est principalement rencontrée sur des exploitations de polyculture-élevage. L'aménagement de parcelles agroforestières en intra-parcellaire est principalement rencontré dans les élevages bovin et lié à la gestion du pâturage (exemple, aménagement de pâturage tournant). Sur notre échantillon, 48 % des parcelles se trouvent dans des élevages de bovins lait et 31% dans des élevages de bovins allaitants. Les élevages de petits ruminants sont moins concernés, ces derniers étant plutôt liés au pâturage de prés-vergers, plus traditionnels. Une pratique émergente concerne l'introduction de l'agroforesterie intra-parcellaire dans les élevages de monogastriques. En général, les aménagements agroforestiers sont imposés par les filières, via la mise en place de cahiers des charges ou de chartes « qualité produits » (AB, Label Rouge, etc.). La surface moyenne des exploitations de l'échantillon (suivant les données disponibles – 45 exploitations de l'échantillon caractérisées) est de 182.5 ha avec de très petites unités de production (moins de 10 ha) et de très grosses unités (jusqu'à 500 ha). 73 % de l'échantillon est en Agriculture Biologique. L'élevage est le système où l'agroforesterie se développe le plus. Les objectifs principalement mis en avant sont la zootechnie, le bien-être et la santé animale et 67 % des plantations Lorraines sont en prairies permanentes.

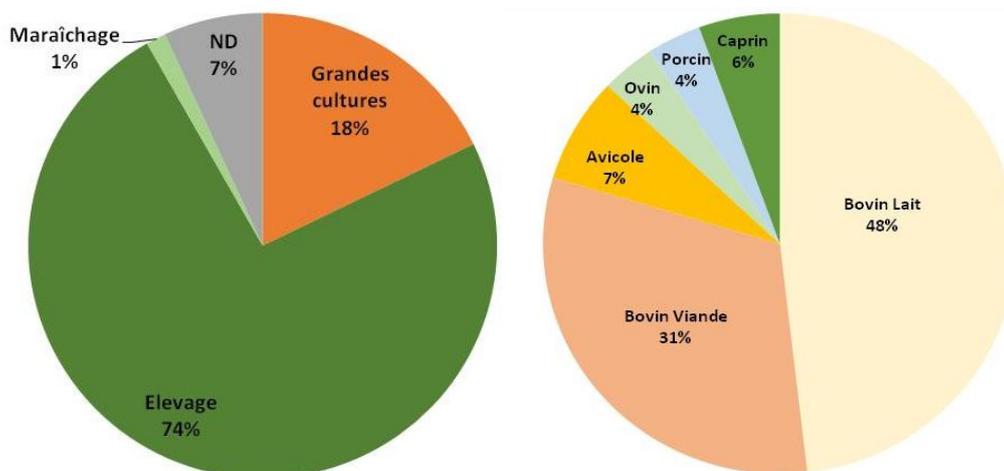


Figure 11. Caractéristiques des exploitations au sein desquelles des parcelles en agroforesterie intra-parcellaire sont installées en région Grand-Est.

3.1.1.2.2. Caractérisation des projets de plantation (une parcelle = un projet)

Afin d'aller plus loin dans la description des projets de plantation de notre échantillon, ces derniers sont décrits selon deux critères, permettant de clarifier les objectifs liés à l'introduction d'alignements d'arbres dans les parcelles agricoles.

- L'objectif de services qui définit les attentes des agriculteurs en termes de services rendus par les arbres, support de la production agricole ;
- L'objectif de production qui est à la base du choix du type de dispositif, des essences implantées et de leur conduite (taille de formation, entretien).

La biodiversité est citée par 100 % des exploitants, mais n'est donnée comme objectif de service dominant que dans 12% des cas (Figure 12). En lien avec le profil des exploitations de l'échantillon, 49% des exploitants déclarent réintroduire des arbres afin de répondre à **des enjeux zootechniques** (bien-être animal, complément fourrager, arbres médicaments, etc.). Quatorze pourcents des projets ont pour objectif de service dominant **l'enjeu agronomique** (maintien des sols, maintien et amélioration de la fertilité, etc.). À noter que 21% de l'échantillon n'a pas établi d'objectif de service en lien avec la construction de leur projet.

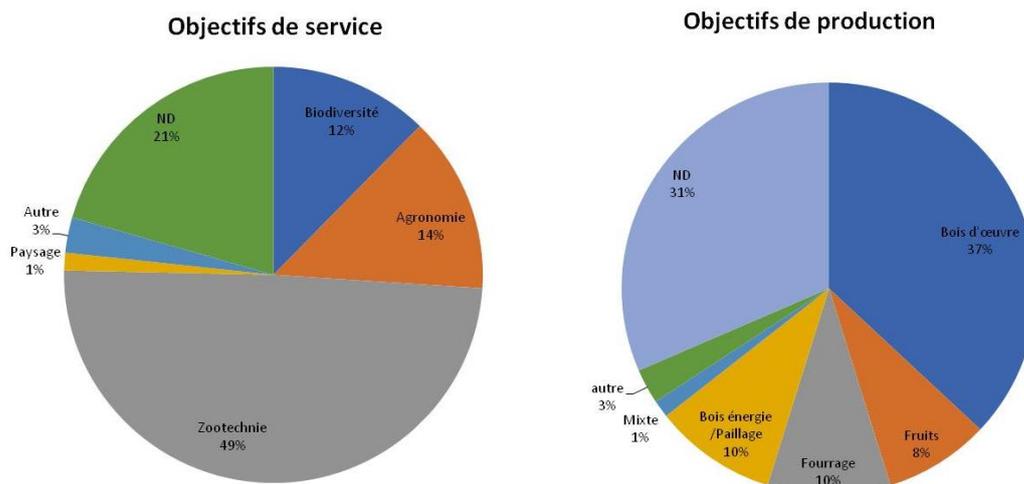


Figure 12. Objectifs de service et de production des exploitants implantant des parcelles agroforestières intra-parcellaires dans le Grand-Est.

L'objectif de production dominant est la production de bois d'œuvre (Figure 12). Viennent ensuite à parts égales la production de petits fruits, fruits de bouches et fruits à coques, la production de complément fourrager et la production de plaquettes (bois énergie ou paillage des animaux d'élevage). 31% de l'échantillon ne formule pas d'objectif de production, ce qui est caractéristique des exploitants ayant mis la biodiversité en objectif de service dominant. Cette notion d'objectif de production est souvent difficile à appréhender et à formuler par les exploitants, plutôt habitués aux cultures annuelles. La projection sur le moyen et long terme est un exercice nouveau, mais reste néanmoins déterminante afin de définir la conduite de la parcelle.

3.1.1.2.3. Description des parcelles et des plantations

Le nombre d'arbres par hectare est très variable avec une moyenne de 26 arbres/ha, mais les écarts sont importants avec des densités minimums de 3.2 arbres/ha et des densités maximums de 95 arbres/ha. Ces densités sont calculées en tenant compte de la parcelle dans son intégralité. Les faibles densités sont principalement dues à la forme et aux écartements choisis et dans certains cas, au fait que certaines zones de la parcelle ne sont pas implantées. La densité de plantation sur la ligne peut également être impactant, ces écartements pouvant être de 5, 6, 8, 10 ou 12 mètres suivant les projets. Les « arbres de haut jet » sont les principales essences de production (bois précieux, bois d'œuvre, plaquette, etc.) (Tableau 4). Les arbres moyens ou essences secondaires sont à la fois des essences de production (bois d'œuvre, plaquette, complément fourrager ou médicinal, etc.), mais également des essences supports pour la biodiversité. Les essences fruitières concernent soit la production de fruits de bouches, soit la production de fruits à coque, principalement destinée à l'autoconsommation mais rarement mise en place en densité suffisante pour envisager la création d'un atelier de production. Certaines plantations d'arbres d'alignements en intra-parcellaire sont complétées par des essences de bourrage, principalement des arbustes ou des arbrisseaux dont la vocation et d'accompagner les essences de haut jet. Enfin, l'ambiance physico-chimique des parcelles, la texture de sol, la profondeur et la présence ou non d'hydromorphie ne sont pas des facteurs limitants à l'implantation d'arbres intra-parcellaires, mais vont avoir une influence sur le choix des essences et les objectifs de productions associés.

Tableau 4. Essences recensées sur les parcelles agroforestières intra-parcellaires du Grand-Est.

Arbres de haut jet	Arbres moyens ou essences secondaires
Chêne Pédonculé	Erable Champêtre
Chêne Pubescent	Cormier
Chêne Sessile	Pommier Sauvage
Chêne Rouvre	Poirier Sauvage
Chêne Rouge d'Amérique	Saule Blanc
Charme	Sorbier des Oiseleurs
Merisier	Arbres fruitières
Noyer Hybride	Noyer Commun
Erable Sycomore	Pommier
Erable Plane	Poirier
Tilleul Grandes Feuilles	Mirabellier
Tilleul Petites feuilles	Questchier
Aulne	Noisetier

Châtaigner	Essences de bourrages (Arbustes et arbrisseaux)
Orme	Noisetier de Byzance
Frêne	Cerisier à grappes
Alisier Tormalin	Cornouiller mâle
Alisier Blanc	Nerprun Purgatif
Robinier faux acacia	Saule Marsault
Hêtre	Sureau Noir
Bouleau Verruqueux	Camérisier à Balai
Peuplier	Cornouiller Sanguin
Paulownia	Sureau à grappes,
Cèdre	Viorne Lantane
Douglas	Murier Blanc

3.1.1.3. Spatialisation des sites répertoriés en Grand-Est

La cartographie ci-dessous présente les sites agroforestiers avec des alignements d'arbres en intra-parcellaire (Figure 13). Seul l'Alsace n'est pas présente dans cet inventaire. Il faut cependant noter qu'une dizaine de parcelles existe dans le Haut-Rhin et le Bas-Rhin mais les acteurs locaux n'ont pas fourni les informations suffisantes pour une caractérisation fine et leur intégration à cet inventaire. Les sites caractérisés par des alignements d'arbres en intra-parcellaire sont principalement présents sur les quatre départements lorrains. Cela s'explique par la présence importante d'exploitations d'élevage ou de polyculture élevage mais aussi par une implication forte de l'Agence de l'eau Rhin Meuse et des départements dans le développement de l'agroforesterie (source de financement à l'investissement).

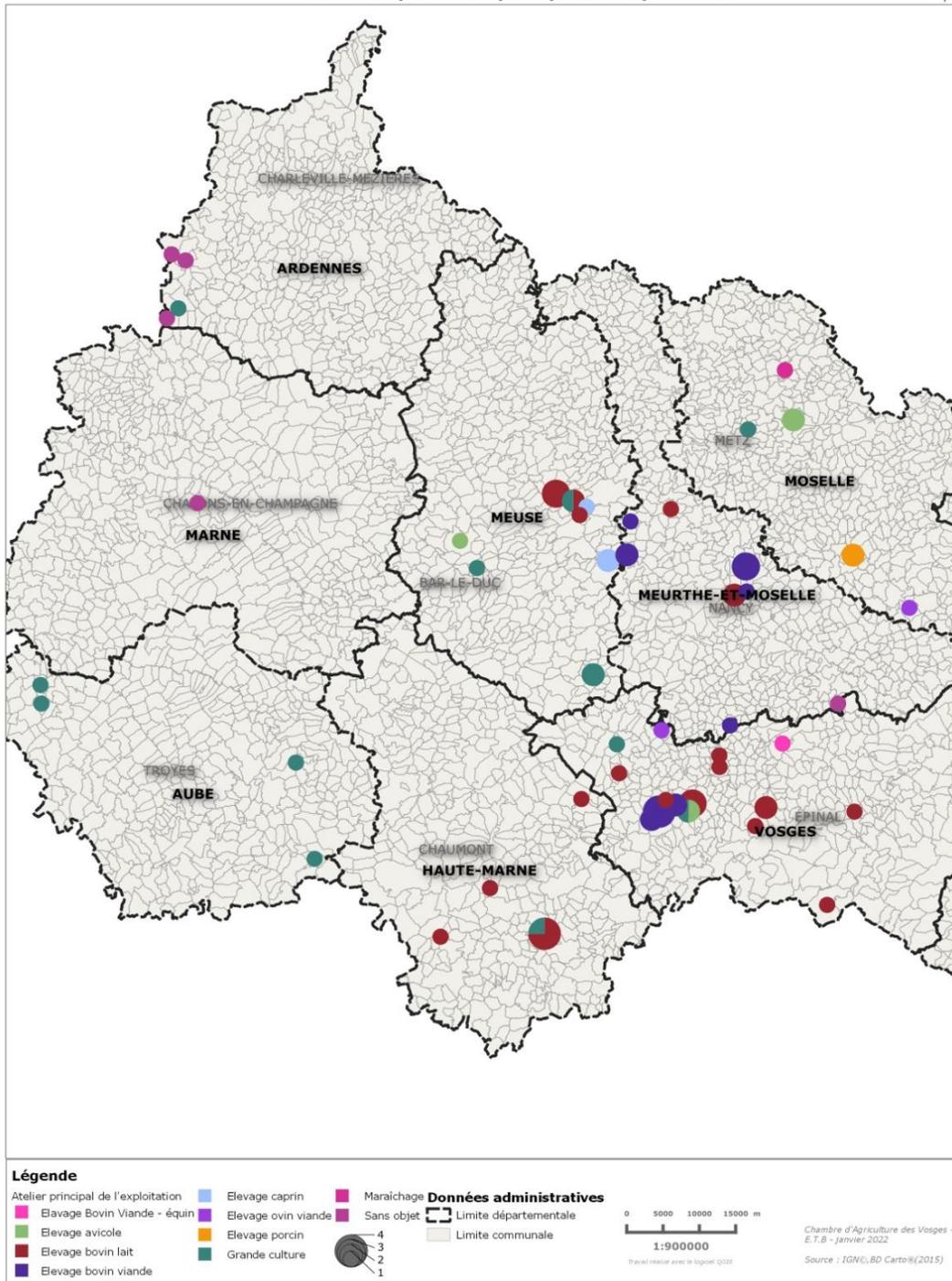


Figure 13. Répartition des projets d'agroforesterie intra-parcellaire dans la région Grand-Est par atelier principal de l'exploitation.

Élément à mettre en avant

Un développement significatif de l'agroforesterie dans le Grand-Est !

Une base de données regroupant plus 70 plantations agroforestières a été constituée dans le cadre de PotA-GE ; elle catégorise l'agroforesterie intra-parcellaire du Grand-Est selon 23 critères. Les parcelles en agroforesterie intra-parcellaire de la région ont également été localisées géographiquement sur le territoire. Globalement, deux vagues de plantation ont été identifiées : entre 2012 et 2014 puis entre 2017 et 2022, périodes où les actions d'accompagnement des agriculteurs ont été les plus significatives. Ce type d'agroforesterie est essentiellement lié aux ateliers d'élevage. En lien avec cela, près de la moitié des exploitants ont pour objectif de répondre à des enjeux zootechniques (bien-être animal notamment). La production de bois d'œuvre est largement dominante. Les densités de plantations balayent large, de 3 à 95 arbres par hectare.

3.1.2. Sélection de sites en situations contrastées

Suite au recensement des plantations, une sélection de sites a été effectuée afin de générer le 1^{er} cercle de sites, devant permettre de transposer l'étude de certains processus étudiés sur le site Pilote de la Bouzule. Au site de Pixérécourt, deux parcelles ayant des itinéraires différents ont été sélectionnées. Les caractéristiques grossières et localisation des parcelles de ce premier cercle de sites sont indiquées sur la figure 14 (étoiles rouges ; le site Pilote de la Bouzule est indiqué par l'étoile bleue ; les stations météo les plus proches sont indiquées par les étoiles vertes). Le site de Quincey bénéficie en plus d'une station météo dans la parcelle (station Weenat, pluviométrie, humidité, température).

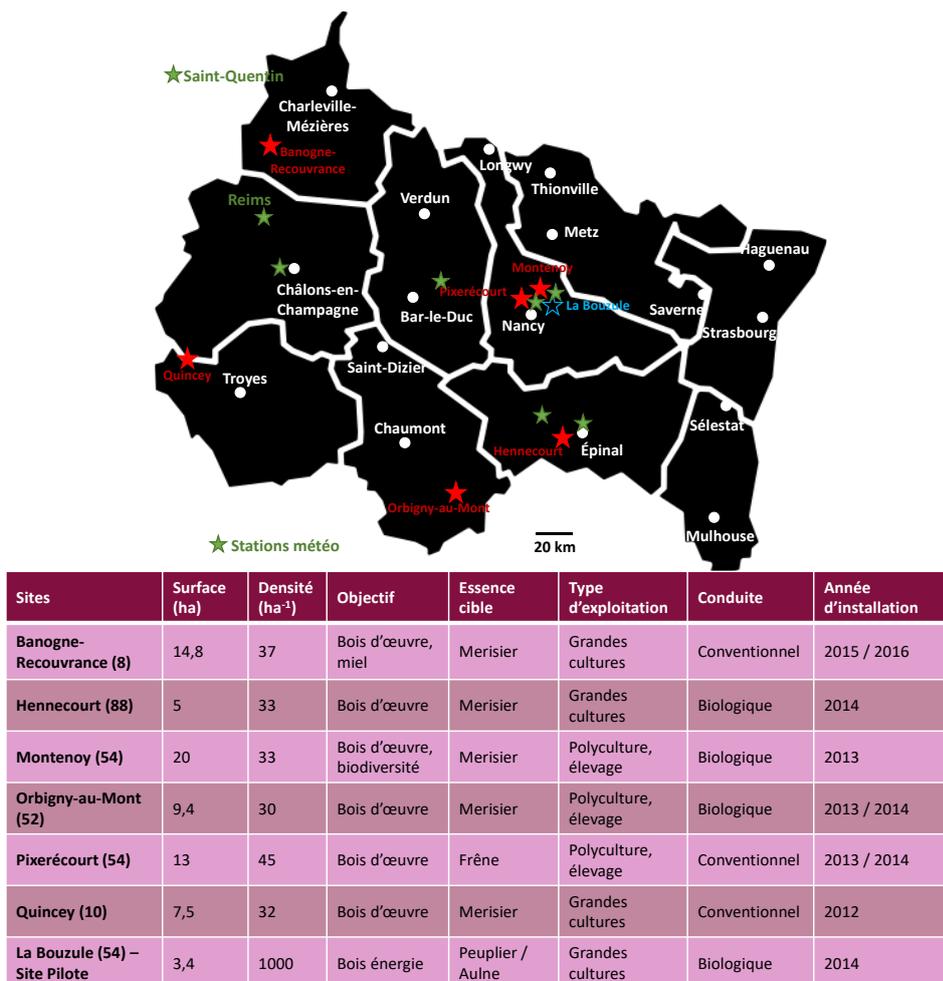


Figure 14. Localisation (étoiles rouges) et caractéristiques grossières (tableau) des sites du 1^{er} cercle dans le Grand-Est. Les étoiles vertes symbolisent les stations météo ; l'étoile bleue, le site Pilote.

3.2. Évaluation des performances et du fonctionnement des plantations agroforestières dans le Grand-Est (indicateurs biophysiques)

3.2.1. Estimation de l'effet de l'introduction des arbres sur la distribution des ressources, les rendements et la croissance

3.2.1.1. Site Pilote

3.2.1.1.1. Composante agricole

En terme de productivité des cultures (Figure 15), les différences entre l'agroforesterie et la culture pure étaient similaires quels que soient l'année, la date de fauche et le bloc : les graminées (prairie temporaire composée de fétuque et de raygrass) étaient beaucoup plus productives en mélange avec l'aulne qu'en culture pure ($P < 0.05$) sans doute en raison de l'apport d'azote que leur procure l'aulne ; en revanche, le trèfle était moins productif sous les peupliers qu'en culture pure ($P < 0.001$) en raison du fort ombrage et des litières très couvrantes des peupliers.

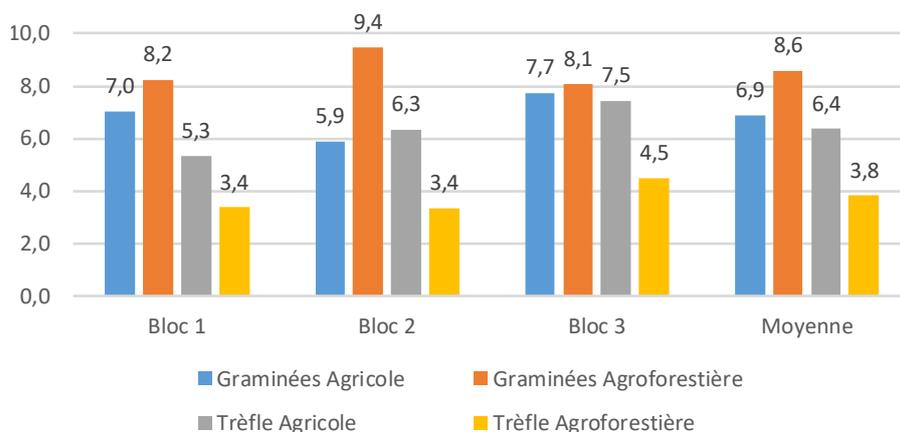


Figure 15. Rendements des couverts herbacés ($Mg.ha^{-1}$) dans les parcelles agricoles et agroforestières (aulne / graminées et peuplier / trèfle) du site Pilote. Fauches cumulées de mai et octobre 2021.

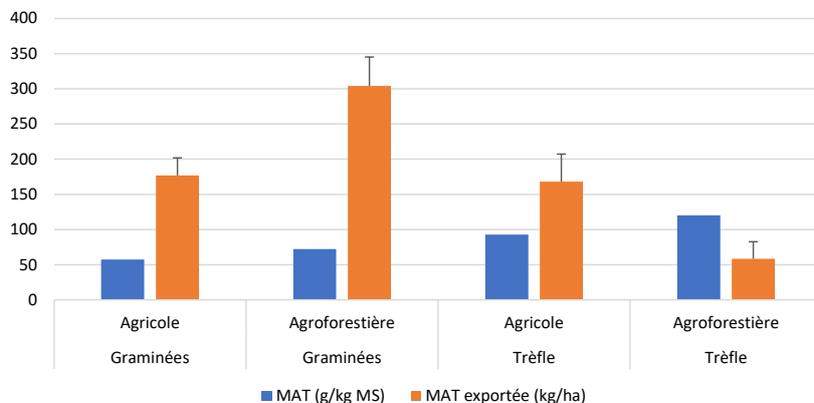


Figure 16. Teneurs en matière azotée totale (MAT, $g.kgMS^{-1}$) et exportée ($kg.ha^{-1}$, tenant compte des rendements) des couverts herbacés dans les parcelles agricoles et agroforestières (aulne / graminées et peuplier / trèfle) du site Pilote. Fauches cumulées de mai et octobre 2021.

Les graminées étaient également plus riches en azote dans les parcelles agroforestières ($P < 0.001$) ayant vraisemblablement bénéficiées de l'apport d'azote procuré par l'aulne (Figure 16). La différence entre le traitement agricole et le traitement agroforestier était encore accrue lorsque la matière azotée était rapportée au rendement (MAT exportée, $P < 0.001$). Concernant le trèfle, il était également significativement plus riche en azote dans le traitement agroforestier que dans le traitement agricole ($P < 0.05$) ; cela peut être dû au fait que les conditions plus contraignantes pour lui en agroforesterie (concurrence importante pour la lumière avec les peupliers) ont stimulé sa fixation d'azote ; cet effet de stimulation de la fixation symbiotique d'azote en réponse à une compétition est un phénomène déjà observé (Dawson et al. 1983). Par contre, en raison des très faibles rendements du trèfle dans les conditions agroforestières, la matière azotée totale exportée devenait très inférieure en agroforesterie par rapport à la parcelle agricole ($P < 0.001$).

3.2.1.1.2. Composante arborée

Fin 2019, la hauteur de tige du peuplier en association avec les cultures fixatrices d'azote (luzerne, puis trèfle) était plus élevée que dans la forêt mixte et la monoculture (Figure 17). Pendant la saison de croissance la plus chaude avec une période sèche marquée en juin-juillet (2018), le taux de croissance en hauteur des peupliers dans le traitement agroforestier était entre trois et cinq fois plus élevé que pour les peupliers dans la monoculture et le mélange forestier. Un processus de facilitation dans les plantations agroforestières pourrait expliquer ce résultat dû à un enrichissement important du sol en azote par les cultures fixatrices d'azote. Ce résultat n'est apparu que plusieurs années après la plantation des arbres, et des actions de gestion ont été

nécessaires afin de contrôler la forte concurrence entre les cultures et les arbres durant les premiers stades : notamment désherbage au pied des arbres et arrosage spécifique des lignes d'arbres. Dans la forêt mixte, les peupliers associés aux aulnes étaient plus petits que dans leur monoculture, malgré une stratification des couverts des deux espèces. Pour les aulnes, la croissance des arbres ne semble pas être affectée par une association avec des graminées ou avec des peupliers. Cette étude a été publiée dans la revue *Forest Ecology and Management* (Thomas et al. 2021).

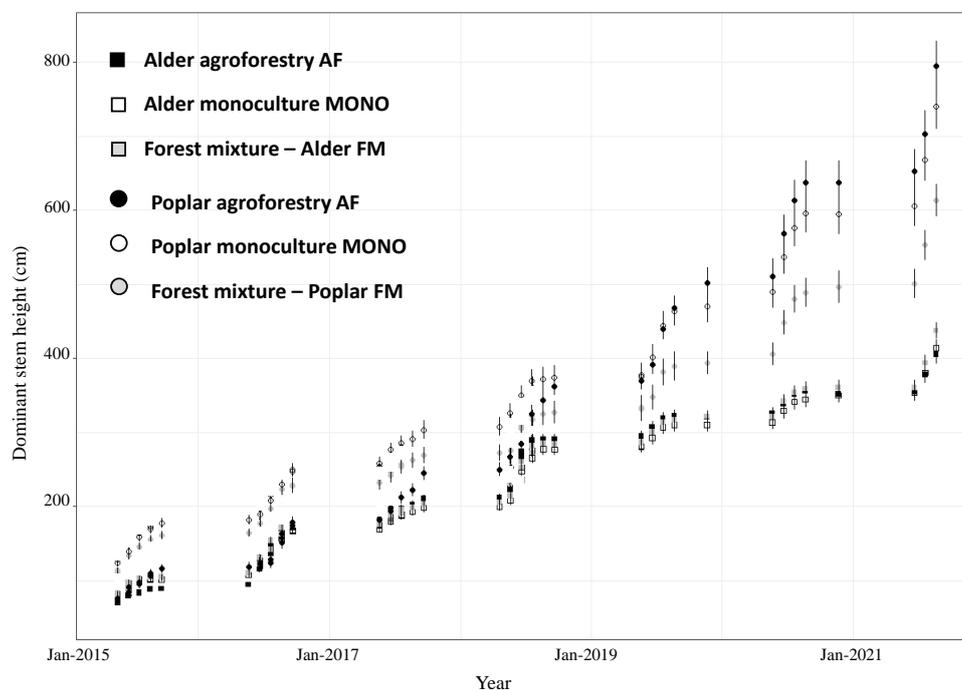


Figure 17. Évolution temporelle des hauteurs totales des peupliers (cercles) et aulnes (carrés) en monoculture (blanc), agroforesterie (noir) et mélange forestier (gris) au site Pilote. Moyennes \pm erreurs standards, $n=60$.

Les peupliers dans les deux types de mélange ont montré une efficacité d'utilisation de l'eau (water-use efficiency, WUE) plus élevée par rapport à ceux en monoculture (Figure 18). Les différences de WUE entre la monoculture et le traitement agroforestier étaient associées à des différences de conductance stomatique et de taux net d'assimilation de CO_2 saturé en lumière (à l'échelle foliaire) et de transpiration (à l'échelle de l'arbre), tandis que les différences entre la monoculture et le mélange forestier étaient plus probablement dues à des différences de conductance stomatique au niveau des feuilles et à la fois à la transpiration et à l'accumulation de biomasse au niveau des arbres. Même si les différences de WUE entre les traitements étaient dans certains cas non significatives, la tendance était dans le même sens quelle que soit l'échelle à laquelle elle était estimée (feuille, bois, arbre), l'agroforesterie affichant les valeurs les plus élevées et la monoculture affichant les valeurs les plus faibles. Tous les indicateurs de WUE, ou leurs proxys (notamment la composition en carbone 13 des tissus), ont donné des résultats cohérents. De plus, plus le proxy de WUE était intégré dans le temps, plus les différences entre les traitements étaient marquées (échanges gazeux instantanés < durée de vie foliaire < cerne de l'année < arbre entier). Les fortes différences observées au niveau des arbres et aux échelles saisonnières peuvent être dues à la somme des différences plus mineures mises en évidence à des échelles spatiales et temporelles plus fines.

D'un point de vue agronomique, la production de biomasse plus élevée et la consommation d'eau plus faible lorsque le peuplier est cultivé en association avec une culture fixatrice d'azote rendent de tels mélanges très prometteurs dans un contexte mondial où l'eau pourrait devenir une ressource limitante. Cependant, cette conclusion doit être modérée par deux réserves :

(1) La densité de plantation d'arbres dans le système agroforestier est deux fois moindre par rapport à la monoculture. Par conséquent, à l'échelle de la plantation, les besoins en eau pour la production de biomasse ligneuse sont susceptibles d'être plus faibles dans le traitement agroforestier que dans la monoculture. Cependant, il est possible que la croissance beaucoup plus élevée observée sous le régime agroforestier (voir Thomas et al. 2021) liée à la production de beaucoup plus de branches que dans la monoculture, se traduise par une biomasse plus élevée dans le système agroforestier, même à l'hectare.

(2) Dans les systèmes agroforestiers, les grands peupliers sont de très forts concurrents pour la culture, dont la production peut être fortement réduite. Les grands arbres doivent donc être abattus avant qu'ils ne menacent trop la production agricole. La longueur de rotation des arbres et la distance inter-rangs entre les arbres doivent être optimisées pour permettre aux arbres de bénéficier le plus longtemps possible de la fixation d'azote par la culture sans faire trop baisser les rendements des cultures du fait d'une trop forte concurrence.

Cette étude a été publiée dans la revue *Tree Physiology* (Thomas et al. 2022).

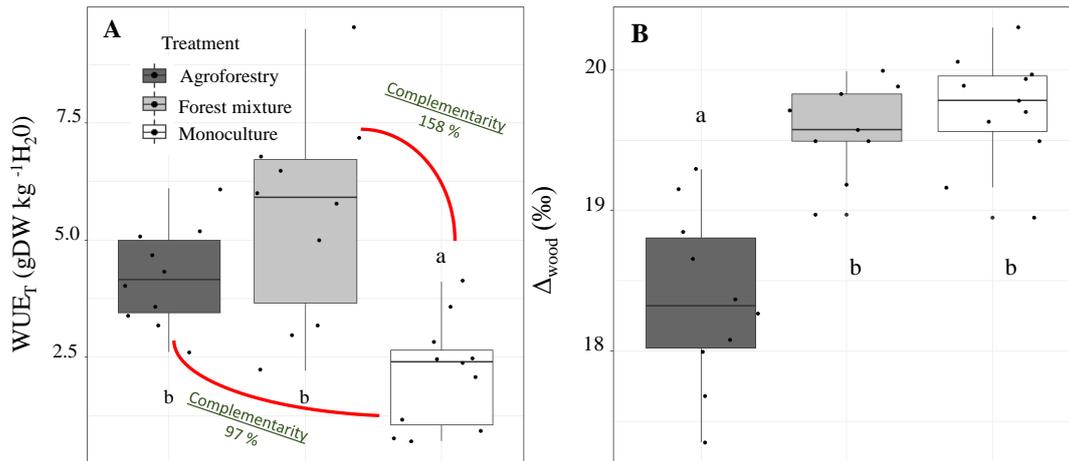


Figure 18. Valeurs (A) d'efficacité de transpiration à l'échelle de l'arbre (WUE_T) et (B) de discrimination isotopique du carbone 13 à l'échelle du cerne (Δ_{wood} , inversement proportionnel à l'efficacité d'utilisation de l'eau) des peupliers en monoculture (blanc), en agroforesterie (gris foncé) et en mélange forestier (gris clair) au site Pilote. Des lettres différentes indiquent des différences significatives entre traitements. La complémentarité correspond au pourcentage de supériorité du mélange d'espèce par rapport à la monoculture.

L'association du peuplier avec des fixateurs d'azote, qu'ils soient ligneux (aulne) ou herbacées (succession luzerne – trèfle), n'avait en revanche pas d'effet significatif sur l'efficacité avec laquelle les peupliers utilisaient l'azote (la quantité de biomasse par unité d'azote dans le bois). Le NUE (nitrogen-use efficiency) n'était en effet pas significativement différent entre les traitements (Figure 19).

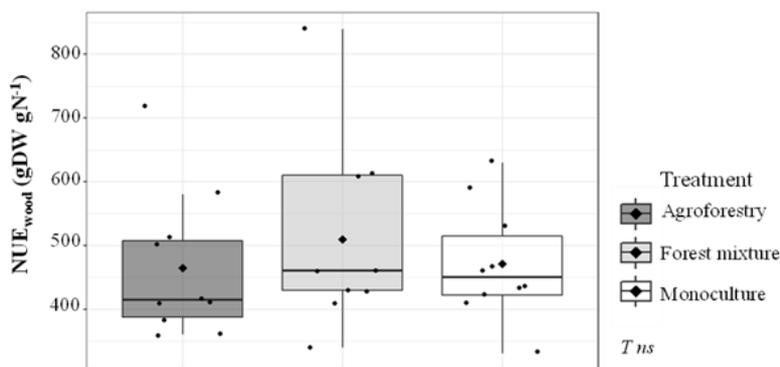


Figure 19. Efficacité d'utilisation de l'azote (NUE, g de biomasse ligneuse / g d'azote) des peupliers en monoculture, en agroforesterie et en mélange avec de l'aulne au site Pilote. $n = 12$. L'effet traitement n'est pas significatif.

Nous avons également montré que la culture intercalaire du peuplier avec une culture fixatrice d'azote peut améliorer considérablement le volume de la cime des arbres grâce à des changements dans la morphologie de la cime (extension latérale et verticale) par rapport aux arbres poussant en monoculture (Figure 20). Ainsi, les peupliers agroforestiers ont pu bénéficier d'un véritable effet du mélange, probablement dû à la présence de trèfle, une espèce fixatrice d'azote, ainsi qu'à une moindre compétition pour la lumière due à un espacement plus important entre les lignes d'arbres qu'en monoculture. En revanche, dans l'association peuplier/aulne, le volume de la cime des peupliers n'est pas affecté par rapport à leur monoculture, malgré une stratification de la canopée suggérant une niche aérienne partagée et par conséquent un effet additif. Cette absence d'effet pourrait être due au fait que l'azote fixé par les aulnes n'était pas encore suffisant pour bénéficier aux peupliers. Enfin, la morphologie du houppier des aulnes ne semble pas affectée par les différents types de mélanges, bien qu'une tendance à l'augmentation du volume du houppier semble se dégager pour les aulnes agroforestiers.

D'un point de vue agronomique, l'augmentation du volume de la cime, et donc de la production de biomasse, qui se produit lorsque le peuplier est cultivé en association avec une culture fixatrice d'azote, fait de ces mélanges une voie prometteuse pour augmenter la production de biomasse pour les énergies renouvelables. Cependant, un développement latéral plus large et des branches poussant plus bas sur la tige en agroforesterie pourraient potentiellement poser problème pour le passage des engins agricoles sur la culture à proximité des arbres. De plus, si le développement de branches plus nombreuses sur des arbres poussant en agroforesterie peut être un atout pour la production de biomasse dans un système où l'arbre entier est valorisé, la branchaison peut aussi être un inconvénient lorsque l'objectif est de produire du bois d'œuvre, système où les arbres sont couramment élagués pour éviter les nœuds dans le bois dus à la présence de branches. Cette étude est en cours de publication dans la revue *Agroforestry Systems*.

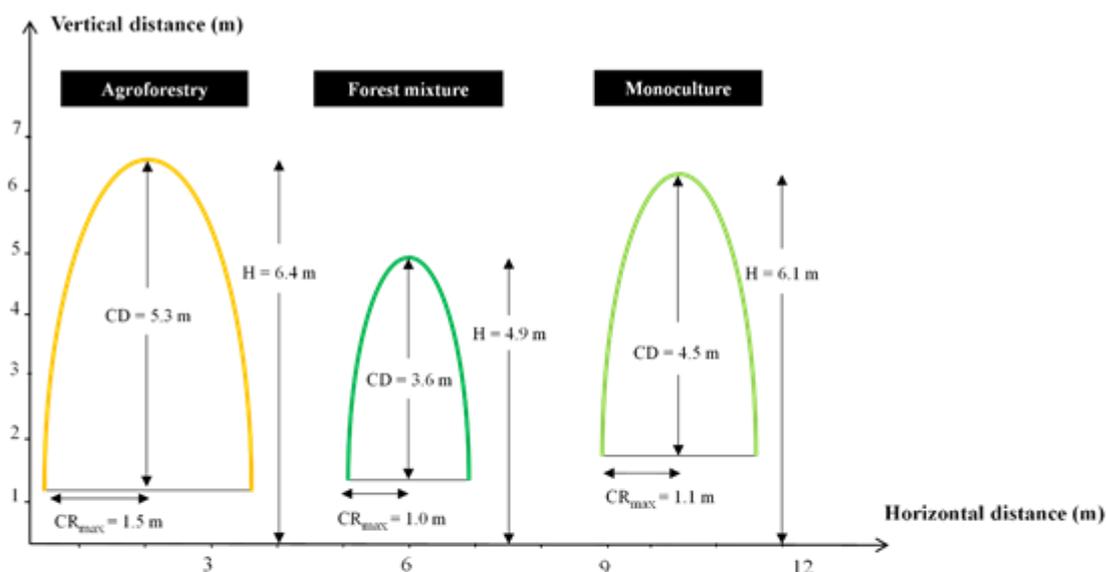


Figure 20. Dimensions verticales et horizontales moyennes des houppiers des peupliers en monoculture, en agroforesterie et en mélange avec l'aulne au site Pilote. H = hauteur totale ; CD = crown depth = profondeur de couronne ; CR_{max} = rayon maximum de couronne.

Élément à mettre en avant

Les peupliers agroforestiers sont beaucoup plus productifs qu'en monoculture !

Sur le site Pilote, après une phase de compétition intense avec les herbacées peu après l'installation des arbres, les peupliers agroforestiers ont bénéficié de l'apport d'azote dans les mélanges avec des fixatrices d'azote ainsi que de l'espacement supérieur entre les lignes d'arbres en présentant une croissance très supérieure à leur monoculture. Cette productivité très stimulée des arbres en agroforesterie était associée avec (1) une efficacité d'utilisation de l'eau (quantité de biomasse produite par unité d'eau consommée) très supérieure à la monoculture, (2) un développement des houppiers beaucoup plus important qu'en monoculture et (3) une saison de végétation des arbres légèrement plus longue qu'en monoculture probablement lié à l'apport d'azote par la fixatrice et à une exposition plus importante aux facteurs climatiques en raison de la densité de plantation plus faible qu'en monoculture. Pour les aulnes, malgré une tendance à des houppiers plus larges en agroforesterie, très peu d'effets significatifs ont été observés par rapport à leur monoculture sans doute en raison de la croissance plus lente des aulnes par rapport aux peupliers et donc des interactions moins fortes entre espèces que dans le cas du peuplier.

Élément à mettre en avant

Un système agroforestier favorable à la croissance des arbres et l'autre favorable à la croissance de la culture !

Dans les deux systèmes agroforestiers du site Pilote, en 2022, l'un est très favorable à la croissance de l'arbre (peuplier / luzerne – trèfle), mais avec un effet négatif sur la culture sous couvert (ombrage très important par les arbres), alors que l'autre est favorable à la croissance de la culture (aulne / graminées) en raison de l'apport d'azote par les aulnes, mais sans effet sur l'arbre. Tous les arbres du site Pilote vont être coupés au cours de l'hiver 2022-2023 en raison de l'intense compétition que les peupliers exercent sur la culture dans les parcelles agroforestières. Une deuxième rotation du dispositif débutera au printemps 2023.

3.2.1.2. Premier cercle de sites

Les caractéristiques des sept parcelles suivies dans le cadre du projet, en termes de dimensions des arbres, de productivité du couvert herbacé sur la ligne d'arbres, de propriétés du sol et de précipitations printanières et automnales entre 2018 et 2022 sont présentées dans le tableau 5. Les arbres sont les plus productifs à Quincey et les moins productifs à Banogne (parcelle la

plus jeune ; cf. figure 14), Hennecourt et Orbigny. La bande enherbée au pied des arbres était plus productive à Hennecourt et Montenoy qu'aux autres sites, mais cette mesure n'a pas été réalisée à Banogne et Quincey. Les sols de tous les sites sont riches en argiles (entre 25 et 35%) ; ils se distinguent par leurs teneurs en sables et en limons : Banogne (08), Hennecourt (88) et Quincey (10) sont à tendance limoneuse, alors que Montenoy, Orbigny et Pixérécourt sont à tendance sableuse. La densité apparente du sol est significativement supérieure aux sites de Banogne, Montenoy et Orbigny alors que le stock de carbone organique est inférieur à ces trois sites (entre 70 et 80 MgC.ha⁻¹) par rapport aux autres sites (entre 100 et 110 MgC.ha⁻¹). Le rapport « carbone / argiles » utilisé comme indicateur de qualité structurale et organique des sols (Prout et al. 2020) suggère que la plupart des sols seraient dégradés (rapport inférieur à 1/13) sauf à Pixérécourt (rapport entre 1/10 et 1/8). Lorsque seuls les 15 premiers centimètres de profil de sol sont pris en compte, le rapport augmente légèrement à tous les sites mais l'indicateur demeure dégradé, sauf à Hennecourt et Pixérécourt. Ces deux sites se distinguent également en termes de teneurs en azote du sol plus élevées. De très fortes concentrations en soufre sont observées dans les sols à Hennecourt, Pixérécourt 1 et surtout, Pixérécourt 2 ; cela pourrait être dû à des apports d'engrais ou de traitements phytosanitaires (mais la parcelle de Hennecourt est en agriculture biologique) ou à une pollution. Les résultats obtenus pour ces trois parcelles et présentés ci-après sont parfois difficiles à interpréter et cela pourrait être dû au fait que leurs sols aient pu être fortement remaniés par le passé. Les cinq années du projet ont été très contrastées en termes de conditions climatiques et notamment de pluviométrie. Les années 2020 et 2022 ont été très sèches alors que 2021, au contraire, a été très humide.

Tableau 5. Caractéristiques moyennes des sept parcelles du premier cercle en termes de coordonnées géographiques, de couvert végétal (tailles des arbres, biomasses d'herbacées), du sol (textures, densités apparentes, stocks de carbone organique, teneurs en N, C, H, S totaux et matière organique, pH et capacité d'échange cationique) et en termes de précipitations printanières (mars à mai) et automnales (septembre à novembre) de 2018 à 2022. Moyennes ± erreurs standards (sommes pour les précipitations). Des lettres différentes dénotent de différences significatives entre sites pour une variable donnée.

	Banogne-Recouvrance	Hennecourt	Montenoy	Orbigny-au-Mont	Pixérécourt 1	Pixérécourt 2	Quincey
Coordonnées géographiques	49.58, 4.13	48.20, 6.28	48.80, 6.24	47.89, 5.47	48.74, 6.18		48.45, 3.60
Couvert végétal							
Hauteur des arbres (cm)	311.9 ± 6.3 A	243.0 ± 8.9 A	427.3 ± 21.5 BC	239.4 ± 17.2 A	493.7 ± 20.5 CD	402.1 ± 17.4 B	520.9 ± 14.4 D
Diamètre des arbres (mm)	35.8 ± 1.2 A	22.2 ± 1.5 A	62.3 ± 4.9 BC	21.3 ± 2.4 A	65.7 ± 4.3 BC	55.6 ± 3.4 B	75.4 ± 3.1 C
Biomasse herbacée sèche (Mg.ha ⁻¹)		3.58 ± 0.06 C	3.77 ± 0.06 C	3.24 ± 0.04 B	2.20 ± 0.04 A	3.17 ± 0.06 B	
Sol							
Argiles (%)	23.4 ± 2.3 A	34.2 ± 6.7 DE	32.3 ± 5.9 E	24.7 ± 3.5 AB	26.0 ± 1.5 B	31.5 ± 3.6 D	29.2 ± 3.3 C
Sables (%)	8.3 ± 1.7 A	8.1 ± 3.3 A	37.6 ± 8.8 C	46.8 ± 3.5 D	44.4 ± 3.7 D	34.3 ± 3.6 B	6.5 ± 8.2 A
Limons (%)	68.3 ± 3.5 E	57.7 ± 6.2 C	30.2 ± 3.3 A	28.5 ± 1.2 A	29.5 ± 2.7 A	34.2 ± 1.6 B	64.3 ± 5.3 D
Éléments grossiers (% du volume)	3.2 ± 0.2 C	1.7 ± 0.2 B	2.8 ± 0.3 BC	0.14 ± 0.05 A	1.7 ± 0.2 B	2.5 ± 0.5 BC	2.3 ± 0.2 BC
Densité apparente (g.cm ⁻³)	1.55 ± 0.02 C	1.30 ± 0.03 A	1.56 ± 0.02 C	1.56 ± 0.02 C	1.38 ± 0.03 AB	1.46 ± 0.01 BC	1.39 ± 0.02 AB
Stock C organique (MgC.ha ⁻¹)	77.5 ± 1.8 A	110.6 ± 5.2 B	79.5 ± 2.4 A	71.8 ± 2.7 A			97.7 ± 3.6 B
Rapport C / argiles – 0-60 cm	0.042 ± 0.002 AB	0.056 ± 0.004 B	0.033 ± 0.002 A	0.043 ± 0.003 AB	0.107 ± 0.004 C	0.109 ± 0.009 C	0.051 ± 0.003 AB
→ Qualité du sol	Dégradé	Dégradé	Dégradé	Dégradé	Bon	Bon	Dégradé
Rapport C / argiles – 0-15 cm	0.054 ± 0.002 AB	0.081 ± 0.004 CD	0.045 ± 0.001 A	0.064 ± 0.004 B	0.121 ± 0.004 E	0.094 ± 0.003 D	0.067 ± 0.003 BC

→ Qualité du sol	Dégradé	Bon	Dégradé	Dégradé	Bon	Bon	Dégradé
Teneur en N (%)	0.11 ± 0.01 A	0.21 ± 0.02 C	0.12 ± 0.01 AB	0.10 ± 0.01 A	0.25 ± 0.01 C	0.25 ± 0.01 C	0.16 ± 0.01 B
Teneur en C total (%)	1.39 ± 0.08 A	6.54 ± 0.19 D	1.21 ± 0.07 A	1.04 ± 0.07 A	3.05 ± 0.11 BC	3.69 ± 0.24 C	2.37 ± 0.20 B
Teneur en H (%)	0.58 ± 0.01 A	0.79 ± 0.03 CD	0.90 ± 0.01 E	0.66 ± 0.01 AB	0.78 ± 0.02 C	0.88 ± 0.02 DE	0.71 ± 0.02 BC
Teneur en S (%)	0.019 ± 0.001 A	0.047 ± 0.001 A	0.028 ± 0.001 A	0.017 ± 0.001 A	0.060 ± 0.002 A	0.182 ± 0.048 B	0.024 ± 0.001 A
pH	8	8.1	8.2	6.5	7.9	7.9	8.1
Capacité d'échange cationique (cmol.kg ⁻¹)	14.1	18.6	15.5	10.8	17.7	17.7	16.8
Matière organique (%)	2.1	5.3	3	2.5	4.8	4.8	3
Climat							
Précipitations automne 2018	100.5	89	76.5	100		87.6	89
Précipitations printemps 2019	153	191.5	149.5	176.5		134.6	191.5
Précipitations automne 2019	208	261.5	193	234.8		202.7	261.5
Précipitations printemps 2020	107	148.5	177	150		132.6	148.5
Précipitations automne 2020	157.5	184.5	156	200.5		150.1	184.5
Précipitations printemps 2021	133	282.5	186	234		152.5	282.5
Précipitations automne 2021	113	133	116.5	116.5		116.5	133
Précipitations printemps 2022	86.5	154.5	149.5	149.5		117.5	154.5

La figure 21 présente le suivi d'humidité du sol sur quatre des sites du premier cercle (Montenoy, Orbigny-au-Mont, Hennecourt et Pixérécourt) entre 2018 et 2022, à deux distances de l'arbre ciblé (pied de l'arbre et mi-distance entre deux arbres, position où l'arbre n'est plus censé avoir d'influence sur la ressource en eau du sol) et à 10 cm et 1 m de profondeur, en parallèle avec les précipitations mensuelles pendant la période. L'asymétrie des courbes d'humidité au pied de l'arbre et en plein champ montre que l'arbre a une influence sur la ressource en eau du sol, mais cela dépend du site considéré. Par exemple au site de Montenoy, le sol est beaucoup plus sec au pied de l'arbre que dans le champ à 1 m profondeur, et cela principalement pendant la saison estivale, ce qui montre que l'arbre puise l'eau en profondeur. À Hennecourt, ce phénomène (moins marqué qu'à Montenoy) est associé avec des teneurs en eau en surface plus élevées au pied de l'arbre que dans le champ comme si l'arbre puisait en profondeur et maintenait un climat plus humide en surface que dans le champ. Afin d'analyser plus finement les facteurs à l'origine de ces variations en présence d'arbre ou non et entre sites, des pentes (vitesses) d'assèchement du sol au printemps et de recharge à l'automne ont été calculées car il semblait que c'est à ces périodes que la présence de l'arbre avait le plus d'influence sur la dynamique de la ressource en eau du sol. Les calculs ont été réalisés pour les quatre années (2018 à 2022) mais nous nous sommes focalisés sur 2020 où la contrainte hydrique était forte pendant l'été (~120 mm de pluie contre, par exemple, ~300 mm en 2021) et où les interactions entre culture et arbre sont donc supposées être plus intenses à ce moment-là.

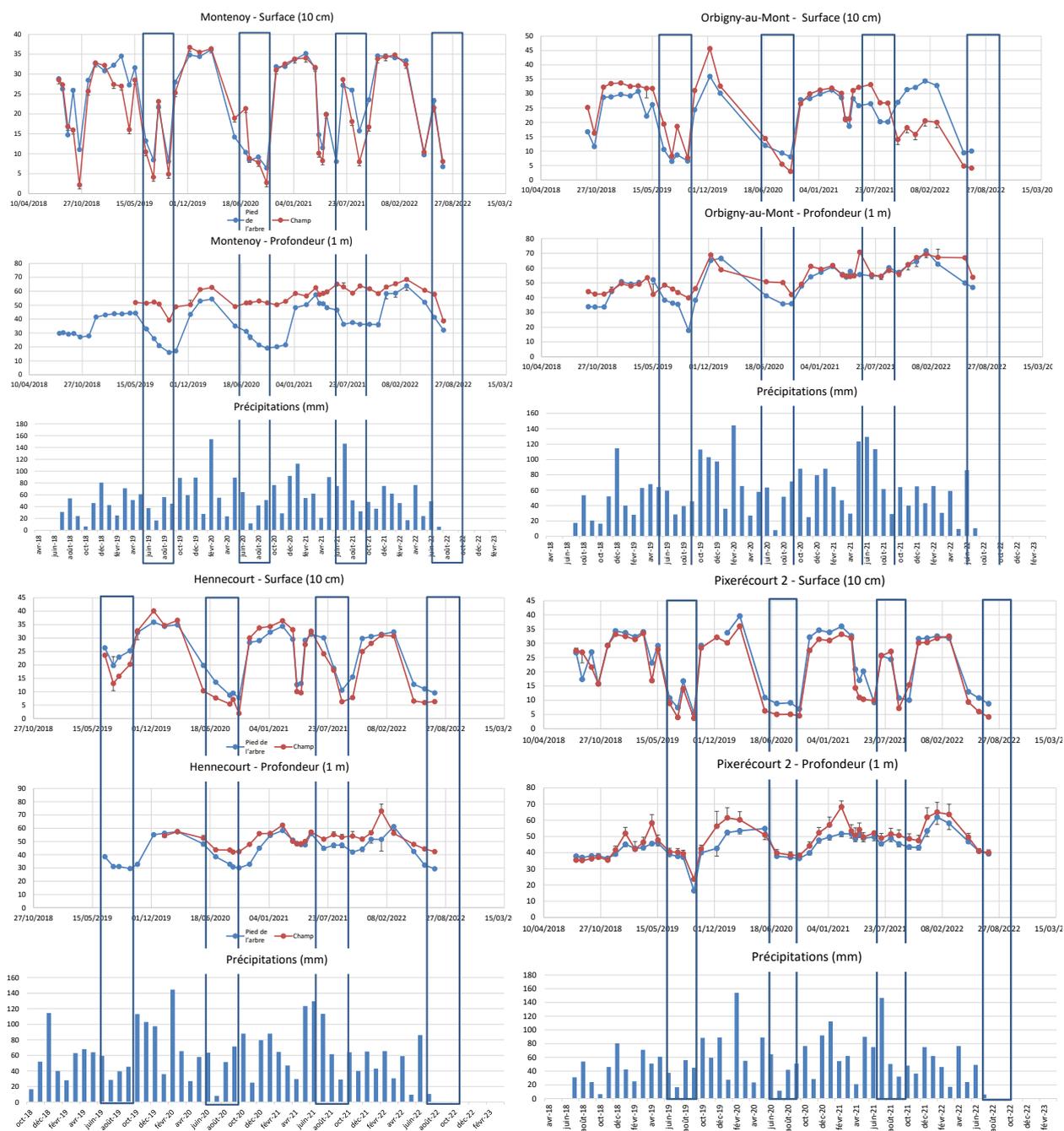


Figure 21. Évolution temporelle des teneurs en eau du sol (en % ; moyennes \pm erreurs standards ; $n=3$) entre 2018 et 2022 aux sites du 1^{er} cercle (Montenoy, Orbigny-au-Mont, Hennecourt et Pixérécourt) à 10 cm et 1 m de profondeur et au pied de l'arbre (courbe bleue) et à mi-distance entre deux arbres (courbe rose), en parallèle avec les précipitations. Les périodes estivales (juin à août) sont encadrées en bleu.

Les vitesses d'assèchement du sol au cours des printemps 2019 à 2022 et les vitesses de ré-engorgement du sol au cours des automnes 2019 à 2021 sont présentées pour les sites de Montenoy et de Hennecourt dans les figures 22 et 23 ci-dessous (les autres sites sont présentés en annexe 4). Pour ces deux sites, des tendances intéressantes concernant l'évolution de ces deux paramètres lorsque l'on s'éloigne de l'arbre (et donc lorsque l'influence de l'arbre sur ces paramètres va en diminuant) se dégagent. Les données des sites de Pixérécourt et d'Orbigny sont présentées en annexe ; elles montrent des effets moins marqués de la présence de l'arbre peut-être en raison du fait que les arbres étaient moins volumineux et ou le sol plus perturbé à ces sites. Les données sont présentées en surface (10 cm) et en profondeur (1 m) pour visualiser des effets entre les deux profondeurs de sol extrêmes mais les données sont disponibles pour les quatre autres profondeurs intermédiaires mesurées (20, 30, 40 et 60 cm). Aux sites de Quincey et sur la deuxième parcelle de Pixérécourt, la comparaison des données avec les autres sites et entre distances à l'arbre s'avère difficile parce que les tubes n'ont pas pu être insérés dans le sol jusqu'à 1,10 m de profondeur comme aux autres sites en raison de la présence de cailloux sur ces parcelles ; néanmoins, les données existent. L'influence relative des caractéristiques des parcelles (nature du sol, précipitations, productivité, etc.) sur ces paramètres descriptifs de l'impact de l'arbre sur la ressource en eau du sol sera évaluée par la suite avec une analyse multivariée.

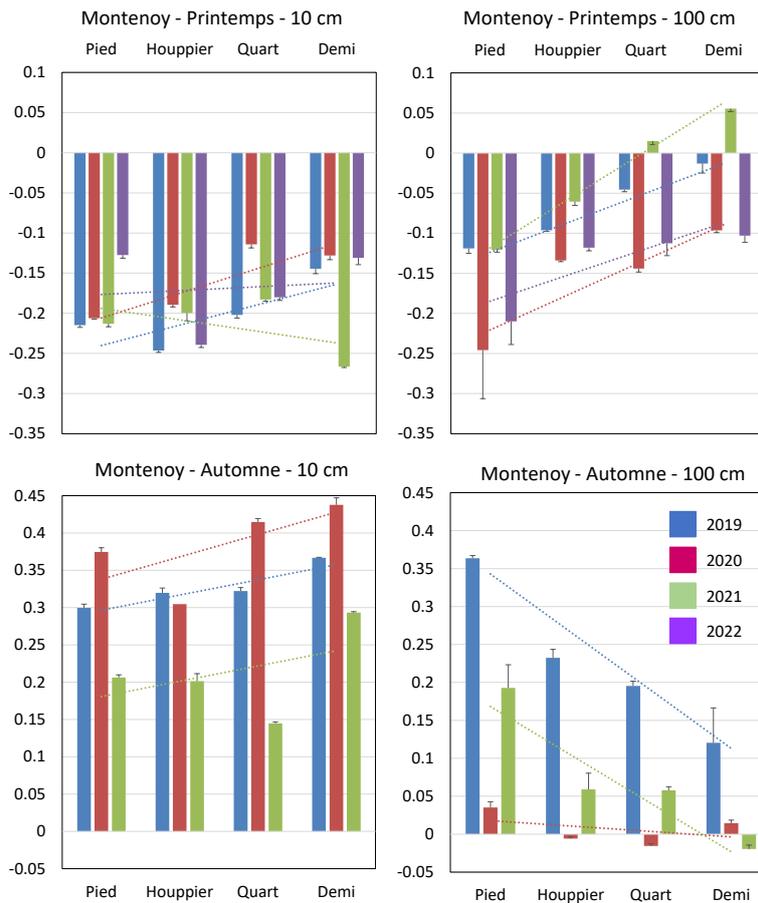
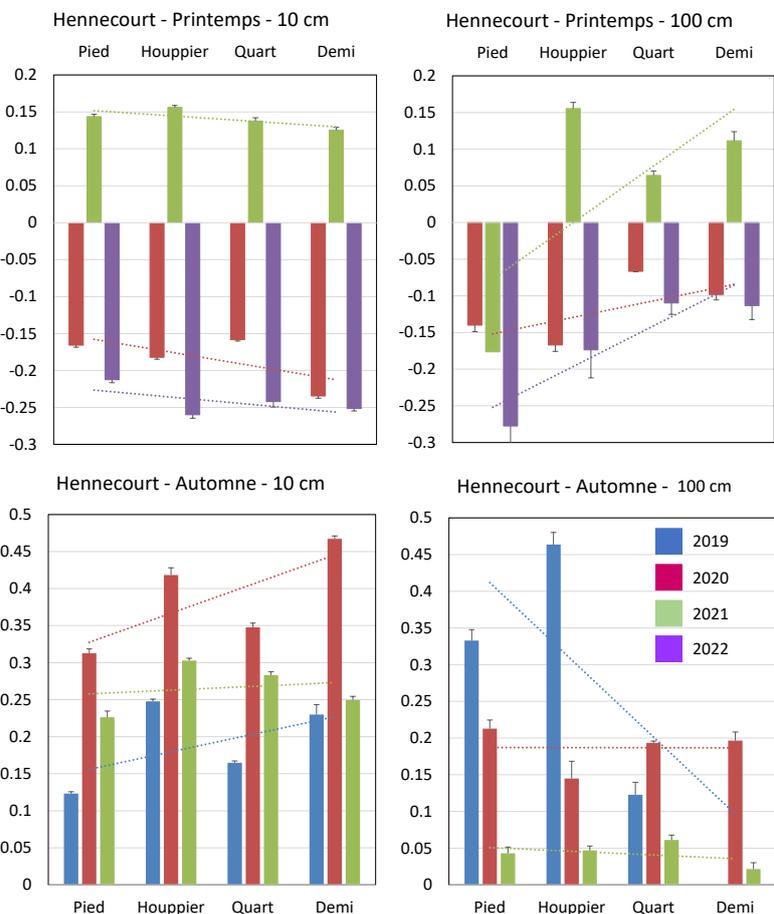


Figure 22. Évolution des vitesses d'assèchement du sol au printemps (en haut) et de ré-engorgement du sol en automne (en bas) en % d'humidité par jour lorsque l'on s'éloigne de l'arbre (du pied à la demi distance à l'arbre moyen) au site de Montenois, à 10 cm et 1 m de profondeur entre 2019 et 2022. Les droites de tendances sont indiquées pour chaque année. Moyennes \pm erreurs standards, $n = 3$ directions de mesure dans le sol. Les valeurs négatives indiquent un assèchement du sol au printemps ; les valeurs positives indiquent une augmentation des teneurs en eau en automne. Globalement, le sol s'assèche plus rapidement au pied de l'arbre qu'en plein champ quelle que soit la profondeur, au printemps. En automne, l'humectation est plus rapide au pied de l'arbre en profondeur.

Figure 23. Évolution des vitesses d'assèchement du sol au printemps (en haut) et de ré-engorgement du sol en automne (en bas) en % d'humidité par jour lorsque l'on s'éloigne de l'arbre (du pied à la demi distance à l'arbre moyen) au site de Hennecourt, à 10 cm et 1 m de profondeur entre 2019 et 2022. Les droites de tendances sont indiquées pour chaque année. Moyennes \pm erreurs standards, $n = 3$ directions de mesure dans le sol. À noter que ce site a été équipé tardivement à l'été 2019 ; il n'y a donc pas de données au printemps 2019. Les valeurs négatives indiquent un assèchement du sol ; les valeurs positives indiquent une augmentation des teneurs en eau. Globalement, le sol s'assèche plus rapidement au pied de l'arbre qu'en plein champ en profondeur et inversement en surface, au printemps. En automne, l'humectation est plus rapide au pied de l'arbre en profondeur, Et inversement en surface.



Il faut noter que l'année 2021 a été extrêmement humide (cf. plus haut) et que les tendances cette année-là sont très particulières par rapport aux autres années du suivi nettement plus sèches ; l'effet de l'arbre sur la ressource en eau du sol est marqué lorsque

l'eau n'est pas présente en abondance, que ce soit au printemps ou à l'automne. À Montenois comme à Hennecourt, au pied de l'arbre, la recharge en eau du sol après la période estivale s'effectue plus rapidement qu'en plein champ en profondeur et au contraire plus lentement qu'en plein champ en surface : il semblerait que l'arbre favorise l'infiltration de l'eau dans le sol, son drainage, et permette de ré-humidifier les horizons profonds plus rapidement qu'en plein champ. Au printemps, l'assèchement du sol en profondeur s'effectue beaucoup plus rapidement au pied de l'arbre que dans le champ suggérant que le prélèvement d'eau par l'arbre est réalisé principalement dans les horizons profonds du sol. En surface, la tendance est la même, dans une moindre mesure et sauf quand les précipitations sont abondantes, mettant en évidence que l'arbre prélève aussi de l'eau dans les horizons superficiels.

Élément à mettre en avant

Une coopération optimisée entre arbre et culture pour la ressource en eau !

- L'arbre et la culture ne puisent pas l'eau dans les mêmes horizons ; pour l'arbre, cela semble être essentiellement dans les horizons profonds (même s'il prélève également dans les horizons de surface dans une moindre mesure).
- L'arbre favorise l'infiltration de l'eau dans le sol vers les horizons profonds lorsque les conditions climatiques redeviennent humides à l'automne.
- L'arbre peut favoriser le maintien d'une humidité du sol plus importante en surface qu'en plein champ lorsque les conditions deviennent sèches.

/!\ L'observation (ou non) de ces phénomènes est très dépendante des conditions pédoclimatiques des parcelles, de l'état de développement du couvert végétal (maturité, phénologie des arbres et cultures), etc.

Printemps 2019		Significativité	Automne 2019		Significativité
(Constante)	0.000	***	(Constante)	<,001	***
Distance à l'arbre	0.000	***	Distance à l'arbre	,433	
Profondeur	0.000	***	Profondeur	<,001	***
Densité apparente	0.001	**	Densité apparente	,381	
Argiles	0.158		Argiles	,441	
Sables	0.781		Sables	,940	
Biomasse herbacée	0.986		Biomasse herbacée	,544	
Taux de croissance des arbres	0.000	***	Taux de croissance des arbres	<,001	***
Éléments grossiers	0.062		Éléments grossiers	,022	
Pluie Printemps 2019	0.002	**	Pluie Automne 2019	<,001	***
Printemps 2021			Automne 2020		
(Constante)	0.000	***	(Constante)	<,001	***
Distance à l'arbre	0.000	***	Distance à l'arbre	,359	
Profondeur	0.097		Profondeur	<,001	***
Densité apparente	0.000	***	Densité apparente	,251	
Argiles	0.000	***	Argiles	,002	**
Sables	0.064		Sables	,006	**
Biomasse herbacée	0.000	***	Biomasse herbacée	,084	
Taux de croissance des arbres	0.000	***	Taux de croissance des arbres	,084	
Éléments grossiers	0.468		Éléments grossiers	,171	
Pluie Printemps 2021	0.069		Pluie Automne 2020	,017	*
Printemps 2022			Automne 2021		
(Constante)	,885		(Constante)	0.816	
Distance à l'arbre	,061		Distance à l'arbre	0.007	**
Profondeur	<,001	***	Profondeur	0.000	***
Densité apparente	,326		Densité apparente	0.000	***
Argiles	,013	*	Argiles	0.001	***
Sables	,432		Sables	0.000	***
Biomasse herbacée	,362		Biomasse herbacée	0.062	
Taux de croissance des arbres	,260		Taux de croissance des arbres	0.001	**
Éléments grossiers	,639		Éléments grossiers	0.941	
Pluie Printemps 2022	,138		Pluie Automne 2021	0.586	

Figure 24. Niveau de significativité des régressions linéaires associant les pentes d'assèchement du sol aux printemps 2019, 2021 et 2022 et de ré-engorgement aux automnes 2019 à 2021 aux caractéristiques édaphiques, climatiques et du couvert des parcelles du premier cercle. À noter que le printemps 2020 n'est pas inclus en raison d'un relâchement du suivi de terrain. * $P < 0.05$, ** $P < 0.01$ et *** $P < 0.001$.

Des régressions linéaires ont été réalisées entre les vitesses d'assèchement des sols au printemps ou de ré-engorgement à l'automne et les caractéristiques édaphiques, climatiques et du couvert des parcelles agroforestières du Grand-Est, caractéristiques susceptibles d'avoir une influence sur les variations des vitesses de ces flux d'eau (Figure 24). Bien sûr, les vitesses d'assèchement et de ré-engorgement sont très dépendantes des précipitations pendant la saison considérée, sauf quand les précipitations sont très abondantes comme en 2021. L'assèchement au printemps est dépendant de la vigueur de la végétation et en particulier de la strate arborée (comme le montre la haute significativité des facteurs « distance à l'arbre », « taux de croissance des arbres » et dans une moindre mesure « biomasse herbacée ») ; par contre, la végétation n'a que peu d'influence

sur le ré-engorgement des sols à l'automne qui est un processus mécanique, dépendant essentiellement de la texture du sol. Mais la vigueur des arbres (facteur « taux de croissance des arbres ») a tout de même souvent une influence sur le ré-engorgement : les racines favorisent l'infiltration et le cheminement de l'eau de la surface vers les horizons plus profonds. Dans tous les cas, les vitesses de ces flux d'eau au printemps et à l'automne sont très dépendantes de la profondeur de sol considérée. Les teneurs en éléments grossiers n'ont pas d'influence significative sur les vitesses, que ce soit au printemps ou à l'automne, mais les parcelles sélectionnées présentaient des sols à faible taux d'éléments grossiers. L'influence de la texture (teneurs en sables et en argiles) est variable entre les années que ce soit pour les vitesses à l'automne ou au printemps ; elle peut être très importante comme au printemps 2021 (très humide) ou à l'automne 2021 ou nulle comme au printemps et à l'automne 2019. Il est difficile de faire ressortir des tendances générales entre les différentes années mais il semblerait que lorsque ce ne sont pas les précipitations qui influencent majoritairement les vitesses de ces flux d'eau dans le sol, la texture devienne le déterminant principal.

Élément à mettre en avant

Des mouvements d'eau dans le sol aux multiples déterminants

Outre l'influence évidente de l'importance des précipitations, l'assèchement du sol au printemps est dépendant de la vigueur de la végétation et en particulier de la strate arborée ; cela est normal car la majeure partie du transfert de l'eau entre le sol et l'atmosphère transite par la végétation. Par contre, la végétation n'a pas d'influence sur le ré-engorgement des sols à l'automne qui est un processus mécanique, dépendant essentiellement de la texture du sol. Il semblerait aussi que lorsque ce ne sont pas les précipitations qui influencent majoritairement les vitesses de ces flux d'eau dans le sol, la texture devienne le déterminant principal.

3.2.2. Estimation de l'effet de l'introduction des arbres sur le fonctionnement des sols – Évolution des pools de matières organiques et processus de décomposition / minéralisation des matières organiques

3.2.2.1. Site Pilote

➤ Approche temporelle

Nous posons l'hypothèse que l'introduction de l'arbre dans les systèmes agricoles conduit à des modifications plus ou moins rapide des caractéristiques physico-chimiques et de l'abondance / structure des communautés microbiennes (changement du ratio bactéries/champignons, sélection de certains genres microbiens, etc.). Les premiers résultats obtenus ont mis en évidence qu'au bout de 4 ans, si l'introduction des arbres dans les parcelles ne modifie pas significativement les teneurs en C et N du sol, elle a des effets significatifs sur la teneur en eau du sol différente selon les espèces associés et l'année considérée (Figure 25, Clivot et al., 2019). Si l'on regarde le compartiment microbien, l'introduction des arbres induit une augmentation significative de la teneur en N de la biomasse microbienne dans le système luzerne-peuplier entre 2015 et 2018 (Figures 25 et 26, Clivot et al., 2019).

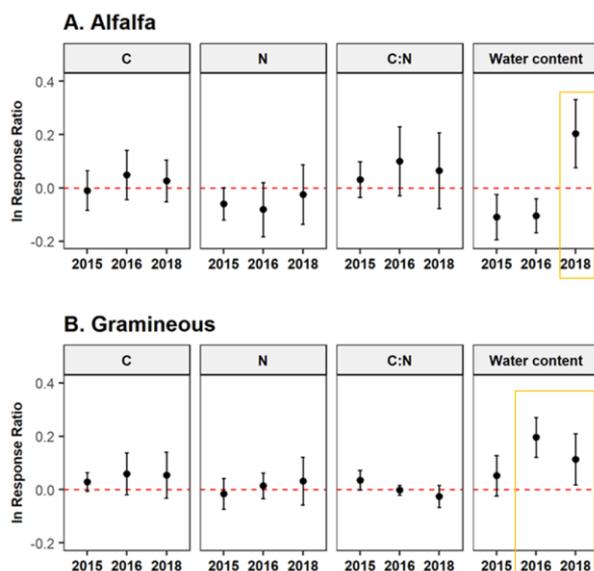


Figure 25. Effets de l'introduction des arbres sur les paramètres du sol mesurés 1, 2 et 4 ans après la plantation des arbres. Les points correspondent au ratio de réponse moyen pondéré entre les systèmes agroforestiers (A. association luzerne-peuplier, B. association aulne-poacées) et les systèmes agricoles de référence pour les trois blocs. Les barres d'erreur représentent les intervalles de confiance à 95 % et les intervalles de confiance qui se chevauchent avec la ligne pointillée indiquent l'absence d'effet significatif de l'introduction des arbres.

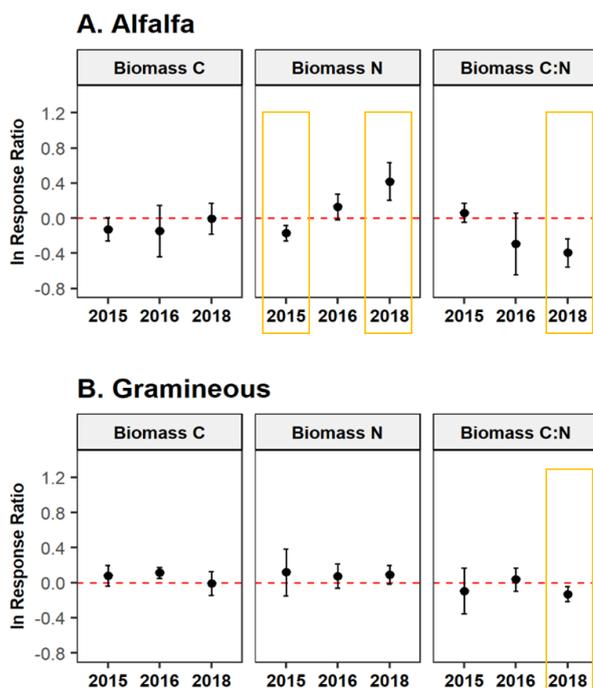


Figure 26. Effets de l'introduction des arbres sur la biomasse microbienne (carbonée, azotée et ratio C:N) mesurés 1, 2 et 4 ans après la plantation des arbres. Les points correspondent au ratio de réponse moyen pondéré entre les systèmes agroforestiers (A. association luzerne-peuplier, B. association aulne-poacées) et les systèmes agricoles de référence pour les trois blocs. Les barres d'erreur représentent les intervalles de confiance à 95 % et les intervalles de confiance qui se chevauchent avec la ligne pointillée indiquent l'absence d'effet significatif de l'introduction des arbres.

L'ADN total de tous les prélèvements de sol de différentes années a été extrait (dernier point de prélèvement échantillonné en septembre 2022) et envoyé en novembre 2022 chez Génoscreen pour séquençage par métabarcoding afin d'évaluer la diversité taxonomique bactérienne (ADNr 16S). La caractérisation de la structure des communautés fongiques est actuellement réalisée dans le cadre d'une collaboration avec Pierre Emmanuel Courty (UMR Agroécologie, Dijon). Les quantifications par qPCR (16S et ITS) sont en cours de finalisation. Il s'agit notamment du premier chapitre de thèse d'Andy Laprie qui est en doctorat (financement INRAE) au sein de l'UMR LAE depuis octobre 2021 et qui est co-encadré par l'UMR Silva. Les premiers résultats sont présentés sur la figure 27. La comparaison des parcelles agroforestières, agricoles et forestières en 2014 met en évidence que le phylum bactérien majoritaire correspond aux Protéobactéries qui sont souvent fortement représentées dans les sols agricoles. En 2016, la proportion de ce phylum a diminué au profit d'autres phylum (Verrucomicrobiota, Myxococcota et Actinobactéries). La comparaison entre les trois modalités ne semble pas montrer de différence significative au bout de deux années d'implantation..

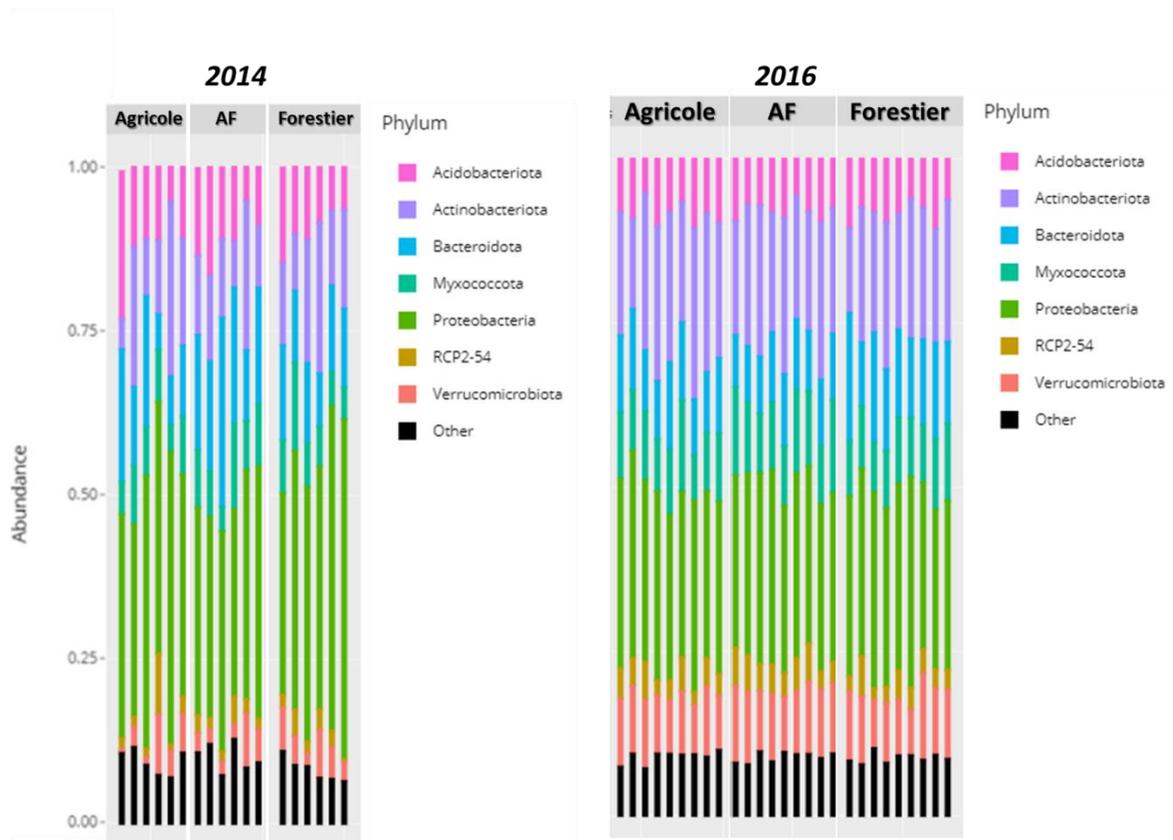


Figure 27. Structure des communautés bactériennes dans les modalités forestières (aulne), agroforestières (aulne-poacées) et agricoles (poacées) en 2016.

L'ensemble des résultats de caractérisation de l'évolution temporelle de l'abondance et de la diversité des communautés microbiennes devraient être disponibles d'ici la fin du premier trimestre 2023.

➤ **Approche spatiale**

Nous posons l'hypothèse que l'introduction d'arbres dans les systèmes agricoles crée une hétérogénéité spatiale des ressources du sol (déposition de C et disponibilité en éléments minéraux) susceptible d'engendrer une structuration spatiale des caractéristiques physico-chimiques et microbiennes différente en système agroforestier en comparaison du témoin agricole. Les premiers résultats présentés sur la figure 28 révèlent que les quantités d'ammonium et de nitrate retrouvées dans la parcelle agricole (Poacées) semblent très homogènes, et inférieures d'un facteur 2 aux quantités retrouvées au sein de la parcelle agroforestière (association aulne-poacées). De plus, les teneurs les plus importantes semblent se trouver à proximité des arbres. Les valeurs d'activité de la leucine-aminopeptidase, enzyme microbienne impliquée dans la minéralisation de composés organiques azotés, sont deux fois supérieures dans la parcelle agroforestière, notamment dans le linéaire sous arboré, alors qu'elles sont plus homogènes dans le sol de la parcelle agricole. Ce résultat préliminaire pourrait suggérer une activité de minéralisation nette de l'azote supérieure à proximité des arbres. Ces résultats restent à confirmer dans les mois à venir lorsque nous disposerons des cartes de krigeage pour l'ensemble des variables aux trois dates de phénologie.

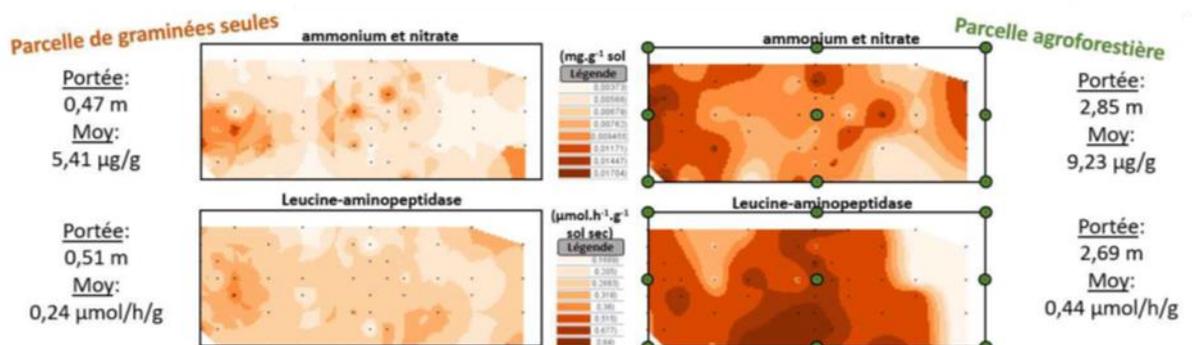


Figure 28. Interpolation par krigeage des teneurs en azote minéral et de l'activité aminopeptidase selon les parcelles : agricole pure (à gauche) ou agroforestière (à droite, rond vert = arbre).

Élément à mettre en avant

Un effet de l'introduction de l'arbre sur le fonctionnement microbien du sol :

- qui se met en place selon une dynamique temporelle à moyen terme... et se traduit par des changements d'abondance, de diversité et de fonctionnalité des communautés microbiennes,
- qui se traduit par une structuration spatiale plus marquée des variables microbiennes dans les parcelles agroforestières en comparaison des parcelles agricoles.

3.2.2.2. Premier cercle de sites

Nous avons posé les hypothèses suivantes :

- l'abondance et l'activité des communautés microbiennes diminuent à mesure que l'on s'éloigne de l'arbre pour aller vers l'intérieur de la parcelle agricole, du fait d'une diminution des pools de C et N labiles et des interactions écologiques entre l'arbre et l'espèce herbacée pour l'interception des nutriments,
- l'effet de la distance à l'arbre sur l'abondance et l'activité des communautés microbiennes est plus marqué dans le linéaire sous arboré (LSA) que dans la parcelle cultivée du fait de la présence des espèces herbacées (déposition de C) et d'un degré de perturbation moins élevé que dans la parcelle cultivée,
- de manière globale les effets de l'arbre sur l'abondance et l'activité des communautés microbiennes sont plus marqués lorsque les rangées d'arbres sont implantées en intra-parcellaire dans des cultures annuelles que dans des prairies permanentes du fait d'une teneur en MO initialement plus importante sous ces dernières.

Si l'on considère l'abondance des bactéries sur le site de Montenois en 2020, on remarque l'existence d'un gradient décroissant du pied de l'arbre jusqu'au milieu de la parcelle (i.e. témoin agricole sans influence de l'arbre). La figure 29 montre que l'arbre n'a plus d'influence significative sur l'abondance des bactéries au-delà de la distance du houppier. La diminution d'abondance lorsque l'on s'éloigne de l'arbre pourrait être liée à une diminution de la teneur en carbone soluble dans le sol.

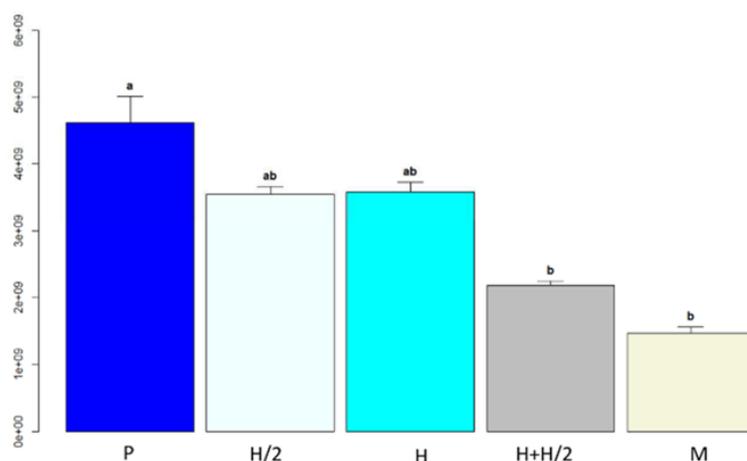


Figure 29. Abondance de bactéries (nombre de copies de 16S par gramme de sol sec) sur le site de Montenois en 2020 en fonction de la distance à l'arbre. Les distances indiquées sont les suivantes : Pied de l'arbre, demi-houppier, houppier, houppier + 1/2 houppier, milieu de parcelle.

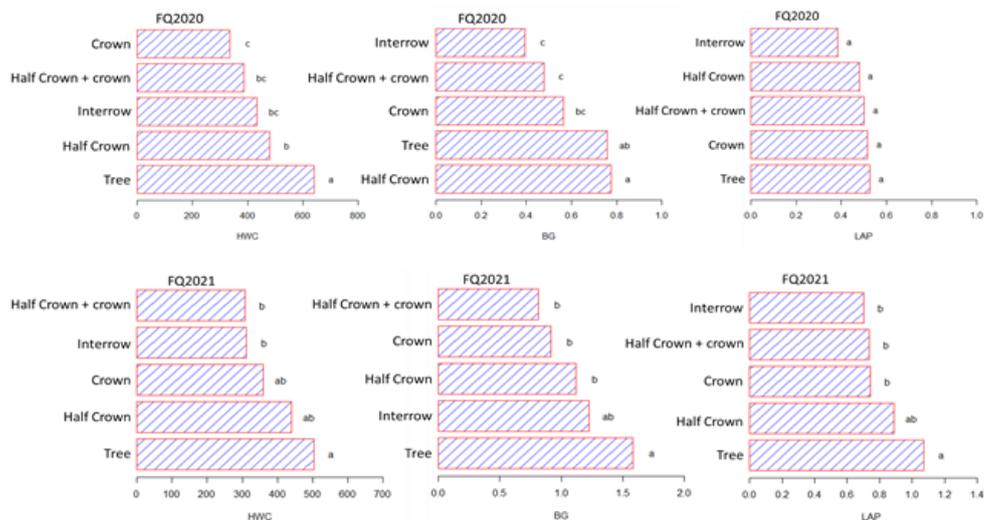


Figure 30. Evolution du pool de carbone soluble (HWC) et de deux activités enzymatiques respectivement en lien avec les cycles du carbone (BG pour beta-glucosidase) et de l'azote (LAP pour leucine aminopeptidase) sur le site de Ferreux-Quincey (FQ) en 2020 et 2021 en fonction de la distance à l'arbre. Les distances indiquées sont les suivantes : Pied de l'arbre, demi-houppier, houppier, houppier + 1/2 houppier, milieu de parcelle.

Sur le site de Ferreux-Quincey, les résultats présentés sur la figure 30 mettent en évidence que quelle que soit l'année considérée les teneurs en carbone soluble (HWC) sont toujours significativement plus élevées à proximité des arbres et les plus faibles au centre de la parcelle. Cela confirme l'hypothèse posée sur le site de Montenois à savoir l'existence d'une corrélation positive entre les teneurs en carbone soluble et l'abondance de bactéries. De plus les activités enzymatiques en lien avec les cycles du carbone et de l'azote sont elles aussi en tendance supérieures au pied de l'arbre. Par contre, aucun effet de la distance sur la rangée d'arbre n'a pu être mis en évidence suggérant un effet de la végétation herbacée supérieur à l'effet du couvert cultivé.

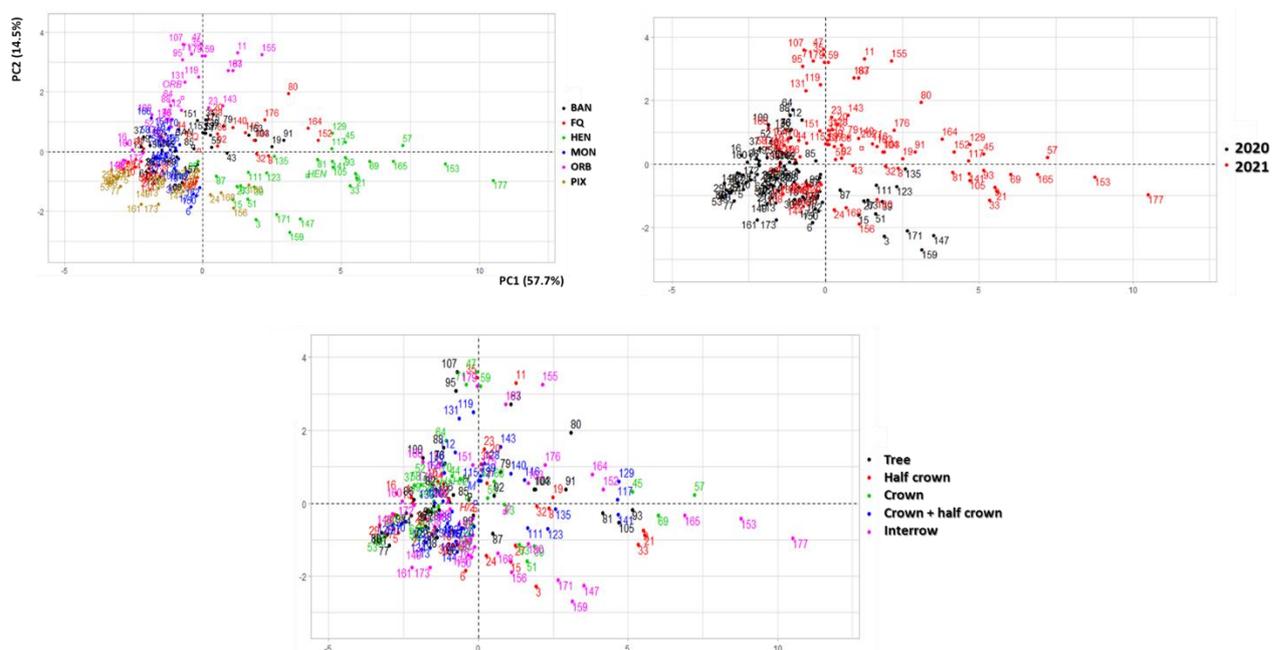


Figure 31. ACP réalisée sur les six sites en considérant les variables édaphiques mesurées en 2020 et 2021 en fonction de la distance à l'arbre. Légende : Banogne (BAN), Ferreux-Quincey (FQ), Hennecourt (HEN), Montenois (MON), Orbigny-au-Mont (ORB), Pixérécourt (PIX). Les distances sont les suivantes : Pied de l'arbre, demi-houppier, houppier, houppier + 1/2 houppier, milieu de parcelle.

Si l'on considère l'analyse multivariée qui reprend l'ensemble des données obtenues sur les six sites en 2020 et 2021 (les données de 2022 sont encore en cours d'analyse), il apparaît clairement que les variables microbiennes suivies sur les sites (notamment les activités enzymatiques) dépendent plus fortement des conditions climatiques de l'année et des caractéristiques des systèmes agroforestiers que de la distance à l'arbre (Figure 31).

Élément à mettre en avant

Un effet bénéfique de l'arbre sur les teneurs en carbone soluble du sol et le fonctionnement microbien... mais qui reste dépendant des conditions pédoclimatiques et des systèmes de cultures dans lesquels l'arbre est intégré.

Les teneurs en carbone soluble, l'abondance des communautés bactériennes et les activités enzymatiques en lien avec les différents cycles du carbone et de l'azote sont notamment supérieures à proximité de l'arbre du fait des dépositions de litières aériennes et racinaires spécifiques à l'arbre mais aussi à la végétation herbacée présente dans le LSA. Les effets sont d'autant plus marqués lorsque l'arbre est intégré dans les systèmes de grandes cultures plutôt que dans des prairies permanentes. Les effets de la distance à l'arbre sont plus prononcés dans la parcelle que dans la rangée d'arbres.

3.2.3. Estimation de l'effet de l'introduction des arbres en termes de bilan environnemental : bilans de gaz à effet de serre (GES) et stocks de carbone des sols

3.2.3.1. Bilans de gaz à effet de serre

Il n'y a pas d'effet du traitement si l'on considère les différents traitements du site Pilote sur l'émission de méthane et de N₂O quand on considère toute la période de mesure (Figure 32).

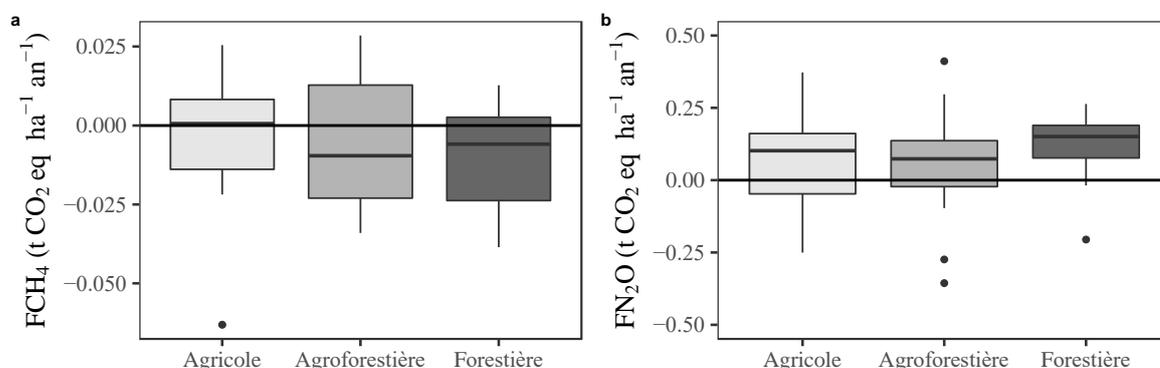


Figure 32. Flux de méthane (a) et de protoxyde d'azote (b) pour les trois traitements de gauche à droite (agricole, agroforestier et forestier). Des lettres différentes indiquent des différences significatives ($p < 0,05$) entre traitements.

L'influence de l'introduction d'arbres en milieu agricole sur le puits de méthane des sols va dépendre de l'association spécifique arbre/culture. Le puits de méthane est ainsi supérieur pour une association prairie/aulne (arbre fixateur agroforestier, Figure 33) que pour du trèfle/peuplier (culture fixatrice, Figure 33). Si l'on considère l'introduction d'arbre par rapport à la culture pure, là aussi le flux de méthane dépendra des associations arbre/culture. En effet, l'introduction de peuplier dans une culture de trèfle n'influencera pas les émissions de méthane tandis que l'introduction d'aulne dans une prairie, augmentera, elle, le puits de méthane (Figure 33). Les mesures complémentaires effectuées sur le site (teneur en azote inorganique, pH, carbone organique dissous, etc.) ne permettaient pas d'expliquer ces résultats divergents entre les deux types d'associations agroforestières. En ce qui concerne le N₂O, quelles que soient les associations considérées, il n'y a pas de différences significatives entre les traitements.

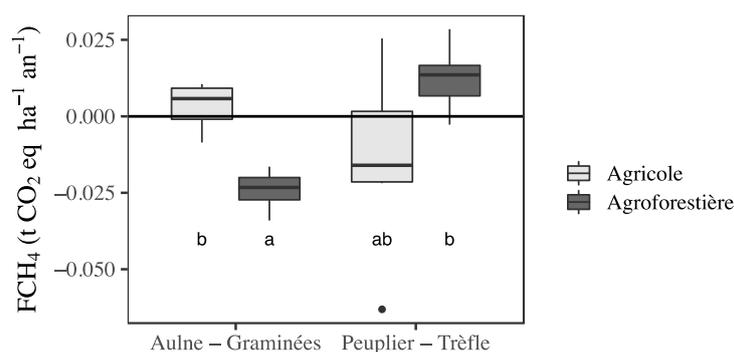


Figure 33. Comparaison entre les deux associations (aulne/prairie et trèfle/peuplier) agroforestière (en gris foncé) et agricole (en gris clair) en termes de flux de méthane. À gauche pour l'arbre fixateur : la culture agricole est une prairie et l'association agroforestière est aulne/prairie. À droite pour la culture fixatrice : la culture agricole est du trèfle et l'association agroforestière est un mélange peuplier/trèfle. Des lettres différentes indiquent des différences significatives ($p < 0,05$) entre traitements.

Élément à mettre en avant

Un effet non significatif de l'arbre sur les flux de méthane du sol... mais dépendant du type d'association d'espèces considéré

Si l'introduction d'arbres en milieu agricole n'a pas provoqué d'effet significatif sur les flux de N₂O et de CH₄ du sol dans le cadre du suivi réalisé dans PotA-GE, un effet significatif de puits de CH₄ a été mis en évidence en agroforesterie par rapport à la parcelle agricole en pur. Néanmoins, un effet apparaît dépendant du type de mélange d'espèces étudié : l'association d'aulnes à de la prairie temporaire (arbre fixateur d'azote) induisait un effet de puits de méthane du système alors que l'association de peuplier à des légumineuses (culture fixatrice d'azote) ne provoquait pas d'effet significatif sur le flux de méthane.

3.2.3.2. Stocks de carbone des sols

L'effet de la présence de l'arbre sur le carbone organique du sol a été testé en comparant les stocks à proximité de l'arbre et en s'en éloignant jusqu'à mi-distance entre deux arbres, position où l'arbre est supposé n'avoir plus d'influence (approche synchronique). L'hypothèse formulée est que le carbone organique stocké dans les sols est plus important à proximité de l'arbre que dans le champ, et que cet effet est retrouvé en profondeur en raison de l'enracinement plus profond des arbres que des herbacées. L'ANOVA à trois facteurs (site, distance à l'arbre, profondeur) réalisée sur les données de stocks de carbone des sols n'a pas mis en évidence d'effet significatif de la distance à l'arbre sur les stocks (Figure 34). Cette absence d'effet de l'arbre sur le carbone organique du sol a été confirmée lorsque les données de chaque site étaient analysées séparément. Par contre, les facteurs « profondeur » et « site » étaient très significatifs ($P < 0.001$), les horizons de surface étant (sans surprise) nettement plus riches en carbone organique que les horizons profonds (chaque horizon de 15 cm étant très significativement différent des autres) et les sols des sites de Hennecourt, Pixérécourt et Quincey étant significativement plus riches en carbone que ceux des autres sites, et significativement différents entre eux (Pixérécourt > Hennecourt > Quincey) (Figure 35). Voir les stocks totaux par site dans le 3.2.1.2 ci-dessus. Les valeurs de stocks de carbone sont du même ordre de grandeur que celles observées pour d'autres parcelles agroforestières du sud et de l'ouest de la France dans le cadre du projet AGRIPSOL (Cardinael et al. 2017). Dans cette étude, un effet significatif de l'agroforesterie sur le stockage du carbone dans les sols avait été mis en évidence. Néanmoins, les parcelles étudiées étaient pour la plupart beaucoup plus âgées que celle de PotA-GE (jusqu'à 41 ans) et il est probable que le réseau de parcelles étudié dans le Grand-Est soit trop jeune pour y observer des effets de l'arbre sur le stock de carbone organique du sol (la parcelle la plus âgée est celle de Quincey : 10 ans). Plus largement, les valeurs de stocks en fonction de la profondeur documentées dans PotA-GE sont également du même ordre de grandeur que celle compilées par Shi et al. 2018 dans leur méta-analyse à l'échelle mondiale (basée sur 126 parcelles agroforestières).

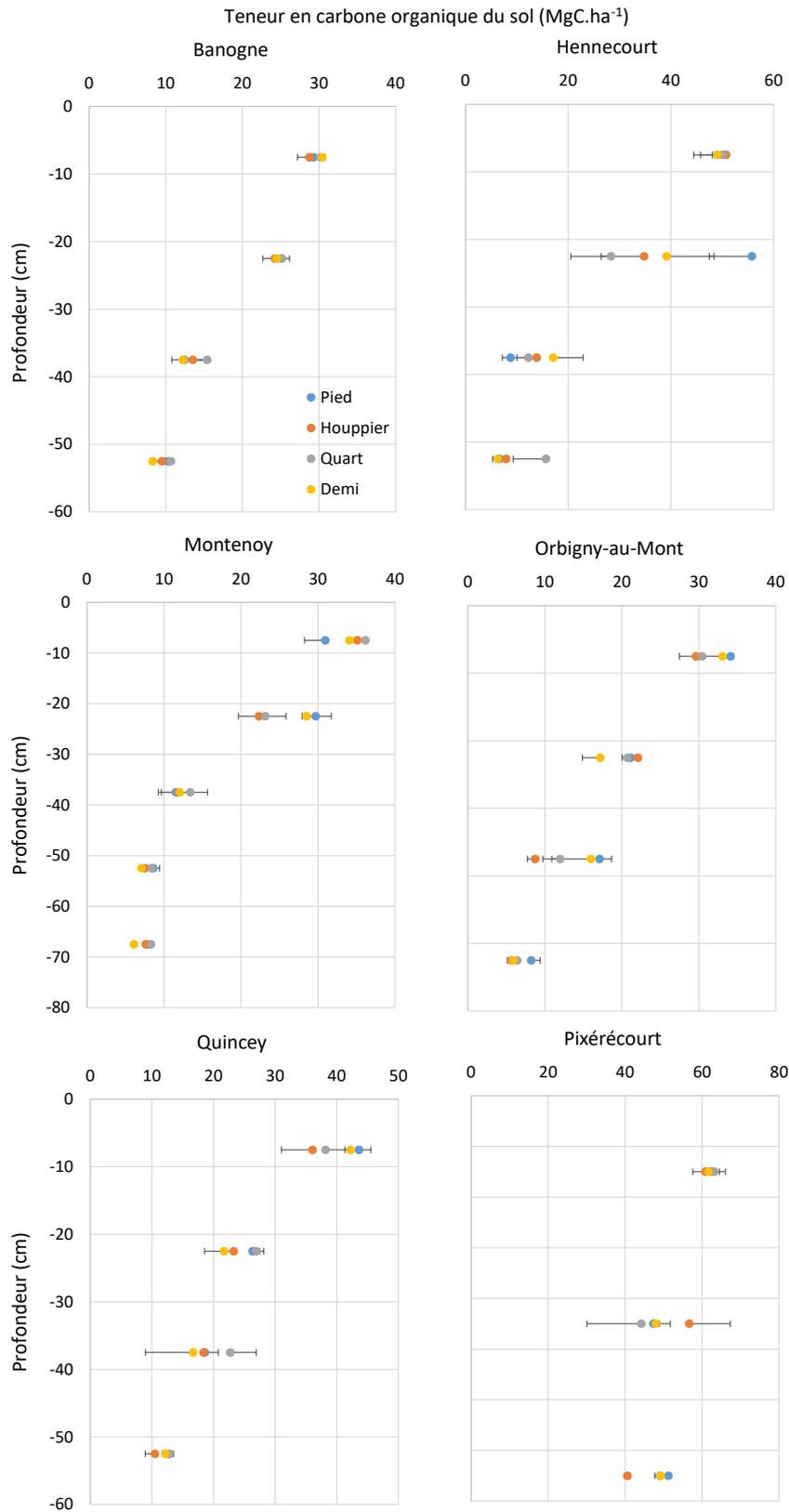


Figure 34. Stocks de carbone (en $\text{MgC} \cdot \text{ha}^{-1}$) des sols de Banogne, Hennecourt, Montenois, Orbigny, Pixérécourt et Quincey en fonction de la profondeur et de la distance à l'arbre : pied (bleu), limite de houppier (orange), quart (gris) et demi (jaune) distance de l'arbre voisin. Moyennes \pm erreurs standards, $n = 3$ transects.

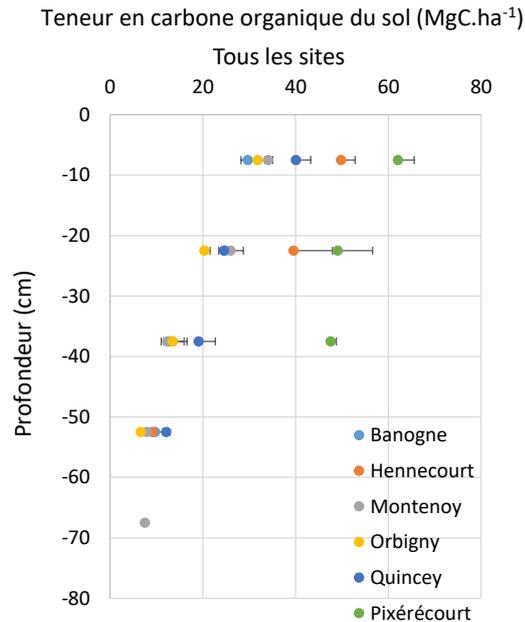


Figure 35. Stocks de carbone (en $\text{MgC}\cdot\text{ha}^{-1}$) des sols de Banogne, Hennecourt, Monteny, Orbigny, Pixérécourt et Quincey en fonction de la profondeur, toutes distances à l'arbre confondues. Moyennes \pm erreurs standards, $n = 3$ transects.

Lorsque les valeurs de stocks à mi-distance entre deux arbres sont soustraites aux valeurs au pied de l'arbre afin d'évaluer ce que l'arbre a potentiellement apporté en carbone organique, des tendances se dessinent pour plusieurs des sites (Monteny, Pixérécourt, Banogne) avec une augmentation de la différence avec la profondeur (Figure 36). Il semble donc que le carbone organique soit présent en plus grande quantité au pied de l'arbre que dans le champ, en profondeur. Ce résultat est prometteur ; l'évolution des stocks de carbone avec la maturation des systèmes et le vieillissement des arbres devraient aller dans le sens d'un effet bénéfique de l'arbre. En surface, le phénomène inverse semble se produire (valeurs négatives) avec une tendance à plus de carbone organique dans le champ que sous l'arbre. Il ne s'agit cependant que de tendances et elles ne sont pas retrouvées à Quincey et à Orbigny. Il est aussi important de noter que les valeurs à 15-30 cm de profondeur sont souvent erratiques, avec une grande variabilité, peut-être liée à la profondeur de labour ; c'est pour cette raison que Hennecourt n'a pas été inclus ici.

Différence entre le pied de l'arbre et la mi-distance entre deux arbres en termes de teneur en C organique du sol ($\text{MgC}\cdot\text{ha}^{-1}$)

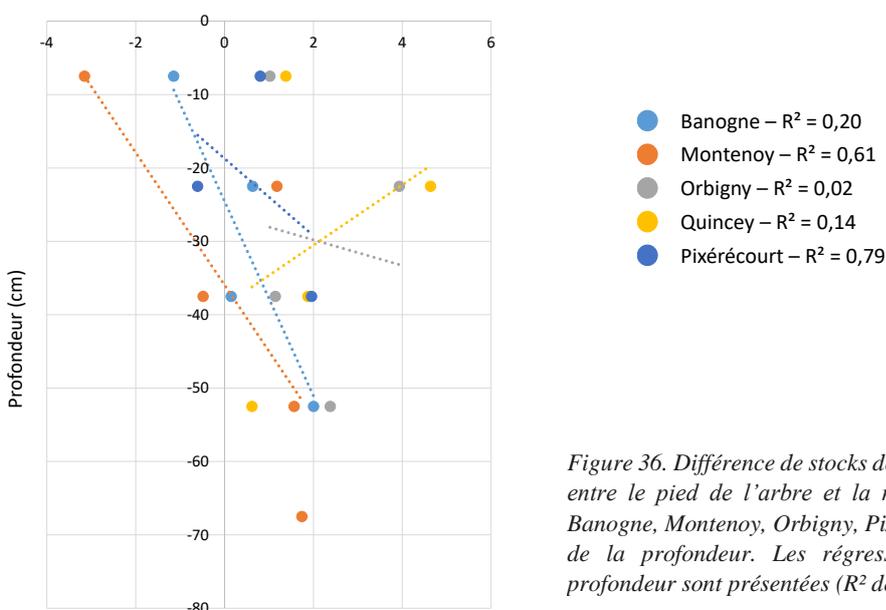


Figure 36. Différence de stocks de carbone (en $\text{MgC}\cdot\text{ha}^{-1}$) des sols entre le pied de l'arbre et la mi-distance de l'arbre voisin à Banogne, Monteny, Orbigny, Pixérécourt et Quincey en fonction de la profondeur. Les régressions linéaires entre stock et profondeur sont présentées (R^2 de Pearson).

Élément à mettre en avant

Pas d'effet significatif de l'arbre sur le carbone organique des sols agricoles du Grand-Est... mais des tendances prometteuses !

L'hypothèse d'un stock accru de carbone organique du sol en présence de l'arbre dans la parcelle agroforestière par rapport au champ n'a pas été validée pour le réseau de sites du Grand-Est. Cependant, des tendances à une augmentation des stocks au pied de l'arbre comparé au plein champ ont été observées en profondeur, là où l'enracinement plus profond des arbres par rapport aux herbacées pourrait avoir un impact sur les stocks, pour la plupart des parcelles suivies. Les parcelles du réseau sont sans doute encore jeunes pour que les arbres aient déjà un effet significatif sur les stocks de carbone du sol mais les tendances observées laissent augurer un effet bénéfique de l'agroforesterie dans les années à venir. Le suivi doit continuer !

	Azote	Densité apparente	Argiles	Sables	Biomasse herbacée	Taux de croissance des arbres	Eléments grossiers	Matière organique	pH	Capacité d'échange cationique	Stock de carbone
Azote	1	-,611**	,465**	-,0024	-,277**	,277**	-,130**	,584**	,213**	,512**	,324**
Densité apparente	-,611**	1	-,397**	,241**	,122*	0,021	,189**	-,386**	-,191**	-,387**	0,012
Argiles	,465**	-,397**	1	-,241**	,389**	-,112*	-,098*	,471**	,376**	,499**	0,038
Sables	-,0024	,241**	-,241**	1	-,336**	,274**	-,130**	0,036	-,532**	-,344**	,161**
Biomasse herbacée	-,277**	,122*	,389**	-,336**	1	-,470**	0,063	-,226**	,108*	-,102	-,217**
Taux de croissance des arbres	,277**	0,021	-,112*	,274**	-,470**	1	,190**	,179**	,448**	,380**	,297**
Eléments grossiers	-,130**	,189**	-,098*	-,130**	0,063	,190**	1	-,0038	,325**	,160**	,492**
Matière organique	,584**	-,386**	,471**	0,036	-,226**	,179**	-,0038	1	,319**	,809**	,376**
pH	,213**	-,191**	,376**	-,532**	,108*	,448**	,325**	,319**	1	,789**	,096*
Capacité d'échange cationique	,512**	-,387**	,499**	-,344**	-,102	,380**	,160**	,809**	,789**	1	,305**
Stock de carbone	,324**	0,012	0,038	,161**	-,217**	,297**	,492**	,376**	,096*	,305**	1

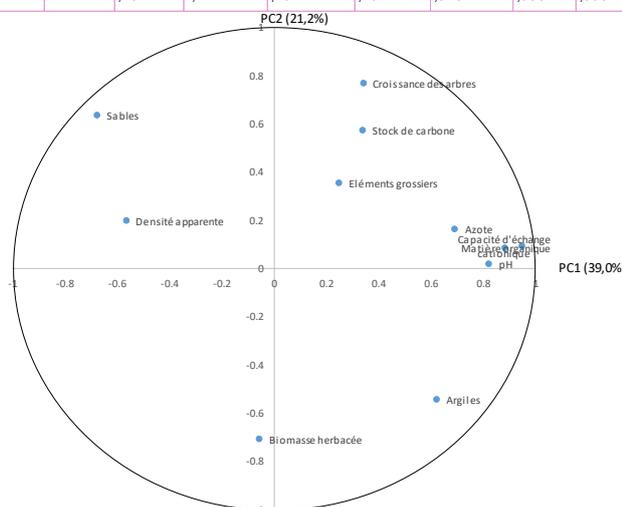


Figure 37. Tableau de corrélations de Pearson (en haut) et plan principal de l'ACP associant les variables descriptives du sol (texture et composition) et du couvert (arbres et herbacées) aux sites du premier cercle. Les étoiles indiquent le niveau de significativité des corrélations : * $P < 0,01$, ** $P < 0,001$.

Une analyse en composante principale (ACP) a été réalisée afin de visualiser les relations entre stocks de carbone dans les sols et caractéristiques des parcelles en termes de texture et de composition des sols et de productivité des couverts ligneux et herbacées. Le plan principal de cette ACP, expliquant 60,2% de la variabilité (PC1=39,0%, PC2=21,2%), ainsi que les corrélations de Pearson entre les variables sont présentés dans la figure 37. L'axe PC1 est clairement indicateur de la fertilité des sols étant fortement associé avec les teneurs en azote et en matière organique des sols. La matrice de corrélation de Pearson montre que le stock de carbone organique du sol est assez bien corrélé positivement à la teneur en azote et en matière organique du sol, aux teneurs en éléments grossiers du sol et, dans une moindre mesure, au taux de croissance des arbres ; certains de ces éléments pouvant influencer positivement le stockage du carbone dans les sols pour les sites du Grand-Est. Une régression linéaire entre le stock de carbone du sol et les variables descriptives du sol et du couvert a également été réalisée (Figure 38). Elle montre, sans surprise que le stock de carbone est fortement influencé par la profondeur du sol mais pas du tout par la

distance à l'arbre (et donc par la présence de l'arbre). Dans cette analyse, seul un indicateur de fertilité du sol a été gardé : la teneur en azote total ; comme précédemment, ce facteur est fortement corrélé aux stocks de carbone dans les sols, tout comme la texture du sol (teneurs en sables et en éléments grossiers) et, dans une moindre mesure, le taux de croissance des arbres. La significativité du taux de croissance de l'arbre dans la régression peut paraître contradictoire avec le fait que la distance à l'arbre n'influence pas le stockage, mais cet effet peut être dû à l'influence de la fertilité des sites sur la croissance des arbres plutôt que l'influence de l'arbre sur le stockage du carbone dans les sols.

Modèle	Coefficients non standardisés		ts standardisés		Sig.
	B	Erreur standard	Bêta	t	
(Constante)	-61.654	13.398		-4.602	0.000 ***
Distance à l'arbre	0.002	0.008	0.012	0.293	0.770
Profondeur	0.855	0.082	0.546	10.398	0.000 ***
Densité apparente	14.034	5.734	0.115	2.448	0.015 *
Azote	206.365	15.491	0.823	13.322	0.000 ***
Argiles	0.030	0.027	0.065	1.114	0.266
Sables	0.048	0.011	0.279	4.405	0.000 ***
Biomasse herbacée	-0.142	0.079	-0.097	-1.798	0.073
Taux de croissance des arbres	-0.272	0.097	-0.147	-2.802	0.005 **
Éléments grossiers	4.954	0.358	0.512	13.840	0.000 ***

Variable dépendante : Stock de carbone organique (MgC.ha⁻¹)

Figure 38. Résultats de la régression linéaire associant le stock de carbone du sol aux caractéristiques du sol (texture et composition) et du couvert (ligneux et herbacé) des parcelles agroforestières du Grand-Est, ainsi qu'à la position sur la parcelle (profondeur et distance à l'arbre). La significativité des variables dans l'analyse est indiquée par les astérisques : *P<0.05, **P<0.01 et ***P<0.001.

En outre, la croissance des arbres sur les parcelles du Grand-Est (estimée ici via un taux moyen de croissance annuelle en hauteur) semble plutôt induite (sans surprise) par la fertilité des sols, et inversement liée à la densité du couvert herbacé comme s'il y avait un compromis entre croissance ligneuse et croissance herbacée sur les parcelles. Mais cela demande à être confirmé.

Élément à mettre en avant

Les stocks de carbone des sols et leur fertilité sous l'influence de la texture des sols !

Bien que le stockage du carbone dans les sols ne soit pas corrélé à la présence de l'arbre, il semblerait que les stocks de carbone organique du sol des parcelles agroforestières du Grand-Est reflètent bien la fertilité des sites, influençant le taux de croissance des arbres. La texture des sols (sables et éléments grossiers) semble également jouer un rôle important. Les stocks de carbone mesurés sont aussi à relativiser en fonction de l'historique des sites, des travaux et pratiques agricoles réalisés sur la parcelle et de leurs éventuels effets « stockant » ou « déstockant » sur le carbone ainsi que de l'état initial des sols ; les rapports C/argiles (Tableau 5) ont en effet montré que cet indicateur de la qualité de la structure des sols était dégradé sur la plupart des sites.

3.3. Évaluation multicritère des potentialités des plantations agroforestières dans le Grand-Est (indicateurs socioéconomiques)

Sur les exploitations répondantes aux enquêtes, il ne se dégage pas de dynamique particulièrement favorable à l'arbre par le passé : de manière globale, les arbres sont stables avec autant d'exploitations avec une augmentation qu'avec une baisse. Dans le cadre de l'enquête, il n'a pas été demandé de quantifier les augmentations ou baisses passées : une telle indication, bien qu'utile, aurait été difficile à collecter dans le cadre d'une enquête à distance. Ce type d'information serait à collecter via une enquête géographique. Pour les agriculteurs qui ont planté des arbres, les plantations sont essentiellement réalisées sur fonds propres (Figure 39). Les aides publiques ont accompagné un peu plus d'une trentaine d'exploitations. Pour approfondir, il faudrait interroger ces exploitations « planteurs » pour évaluer les quantités / surfaces d'arbres plantés sur fonds propres et sur fonds publics et privés.

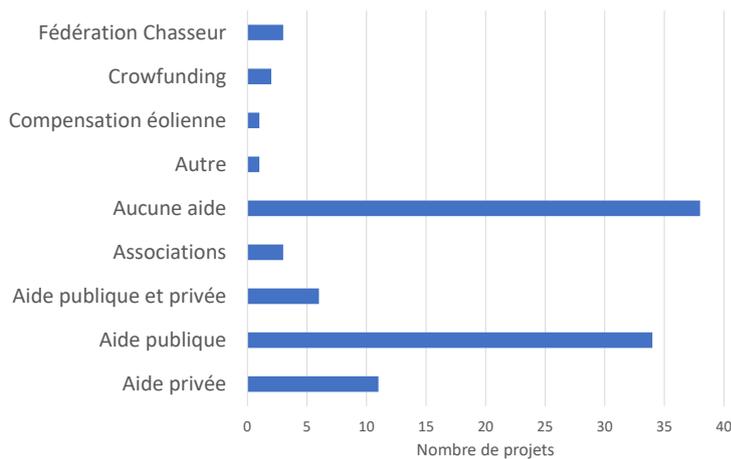


Figure 39. Source de financement des projets de plantations d'arbres déjà réalisées dans le Grand-Est.

On retrouve au travers des réponses le biais initial : les agriculteurs répondants sont très majoritairement motivés pour planter des arbres. Cela représente environ 200 exploitants qui seraient motivés pour planter des arbres. Les $\frac{3}{4}$ des répondants sont certains de planter des arbres :

- Les deux tiers ont besoin d'accompagnement,
- Le dernier tiers a surtout besoin d'informations.

Les raisons des plantations sont avant tout pour répondre à des objectifs agricoles (production, abris, protection des sols, etc.), le financement du plan de relance n'arrive que comme catalyseur (Figure 40). Les contrats carbone non proposés dans le questionnaire ont été cités par plusieurs exploitants.

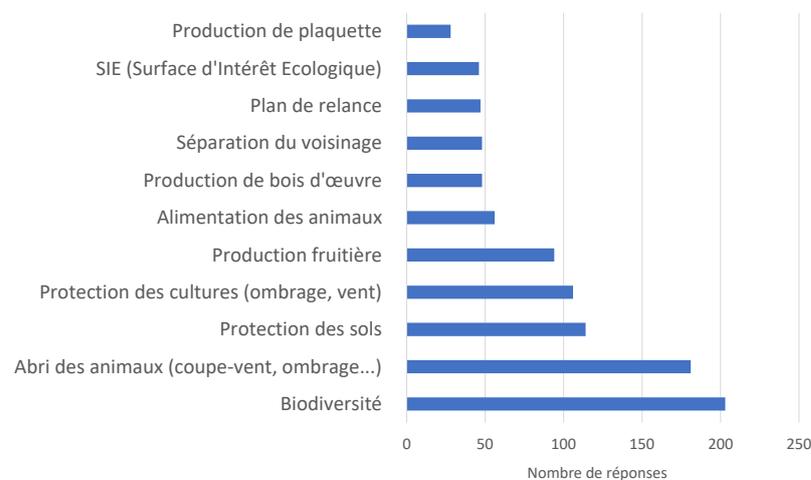


Figure 40. Raisons évoquées pour les plantations d'arbres prévues dans le Grand-Est.

Alors que les plantations déjà faites l'ont été sur fonds propres, le financement est un obstacle majeur au développement des plantations (Figure 41). Cela semble être surtout un obstacle pour des plantations à plus grande échelle. Dans les obstacles qui suivent, le besoin d'accompagnement se retrouve (technique, réglementaire ou gêne sur l'exploitation).

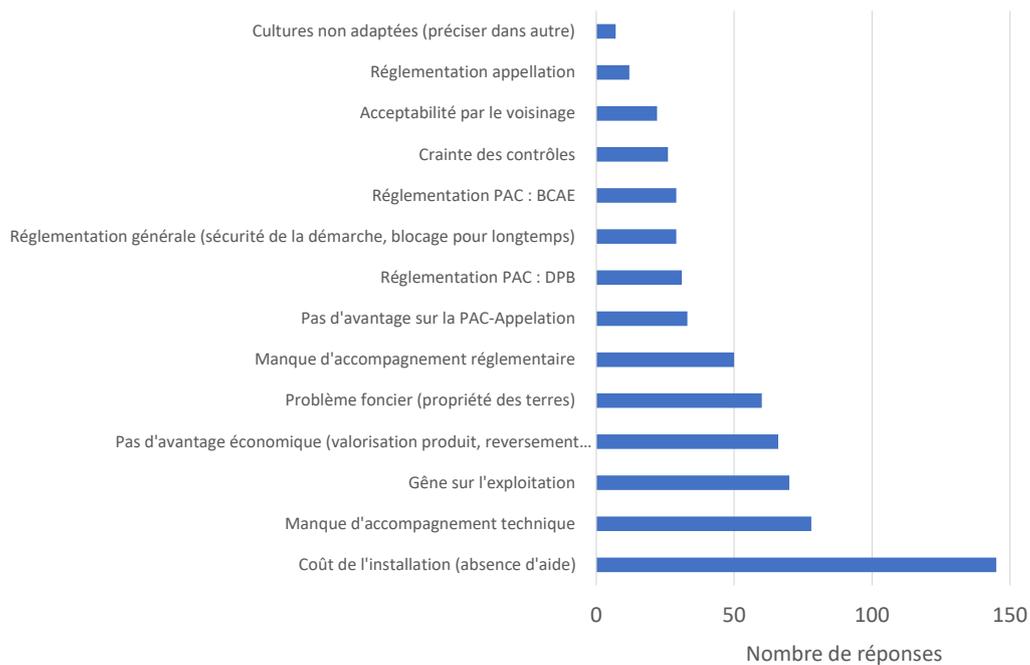


Figure 41. Obstacles à la plantation d'arbres évoqués par les exploitants du Grand-Est.

Cette enquête a montré une forte demande des exploitants du Grand-Est pour l'installation de parcelles en agroforesterie, selon toutes ses formes. Pour répondre à cette demande, plusieurs axes doivent être développés :

- Accompagnement financier : celui-ci permettra de monter en charge et de ne pas en rester à de petites plantations éparpillées. Cela rassurera aussi les exploitants quant à la sécurité de ces plantations
- Accompagnement technique : les agriculteurs semblent réaliser assez bien que la plantation d'arbre demande une technique particulière ; ils sont demandeurs d'être accompagné pour être rassurés.

Les répondants à l'enquête ont formulé divers souhaits et propositions (plus ou moins réalistes) pour réduire les contraintes limitant actuellement l'engouement pour l'agroforesterie dans le Grand-Est (Figure 42). Plus précisément, les exploitants sont en attente de formations à l'élaboration et au suivi d'un projet agroforestier, et ils sont demandeurs de formations sur la plantation (société à solliciter, essences et variétés à planter en fonction des objectifs, etc.), sur l'entretien des arbres, ou encore sur la valorisation du bois produit. Ils demandent à être conseillés et accompagnés de manière adaptée à la taille de leur projet par un technicien spécialisé.

L'information et la compréhension des réglementations sont également un point à améliorer pour faciliter le développement de l'agroforesterie régionale : mieux communiquer sur les normes, les réglementations, les aides, etc., accompagner les exploitants qui souhaitent se lancer en termes, par exemple, de déclaration PAC, en établissant des plans d'aide, en convainquant les propriétaires (ou en autorisant la plantation d'arbres sur les parcelles louées). Les agriculteurs font également des propositions pour faciliter la plantation des arbres : par exemple, comptabiliser les surfaces arborées dans la surface revendicable en AOP (surfaces conservées pour le calcul du quota de production) ; supprimer de la PAC, les SIE liés aux arbres, qui sont nécessaires à la biodiversité ainsi qu'aux animaux (abris pour les vaches, ombres, etc.) pour limiter les obstacles à la gestion des lignes d'arbres (période de taille et d'entretien) qui peuvent décourager l'implantation de nouveaux arbres ; ne pas déduire les haies de la surface PAC ; définir clairement quelle haie peut être comptabilisée dans les SIE (hauteur, taille, espèces, etc.), sans risquer de subir un contrôle problématique de la DDT ; faire le constat que les remembrements et les agrandissements sont les principales raisons de la disparition des haies/arbres isolés, et conditionner les aides PAC à la présence ou à la réimplantation de haies/arbres isolés dans les parcelles de cultures principalement ; accorder l'accès au plan de relance pour les projets qui ne font pas appel au pépiniériste mais qui seront menés par les agriculteurs eux-mêmes car il a été fait le constat que la subvention part directement pour les acteurs périphériques au projet et il reste au meilleur des cas toujours 20% à la charge des meneurs de projet.

Au niveau technique, des regroupements d'achats, la mutualisation d'outils de plantation ou encore la réflexion autour des projets en groupe sont sollicités pour faciliter l'implantation des arbres à l'échelle régionale. Pour réduire le temps de travail représenté par la plantation et l'entretien des arbres pour les agriculteurs, le besoin au recours à des partenariats avec le secteur privé ou des associations est évoqué, ainsi que la nécessité d'améliorer la mécanisation de la plantation et de la récolte. L'importance de réduire les besoins de réaménagement de l'exploitation, de restructuration du parcellaire pour la mise en place des projets agroforestiers est enfin mentionné par les exploitants afin de réduire les contraintes associées à la présence d'arbres sur l'exploitation.

Le recours à une rémunération basée sur des « crédits carbone » en évaluant le bilan carbone par arbre planté est également mentionné par certains agriculteurs comme un facteur incitatif qui pourrait être important. Enfin, des obligations légales au niveau des communes (imposer des ceintures vertes autour des villages, qui ne peuvent être que des plantations d'arbres ?) ou des gros exploitants (obliger les agriculteurs qui ont une exploitation supérieure à X ha à planter en cultures arboricoles équivalentes de 5% ?) pourraient être des leviers à envisager.

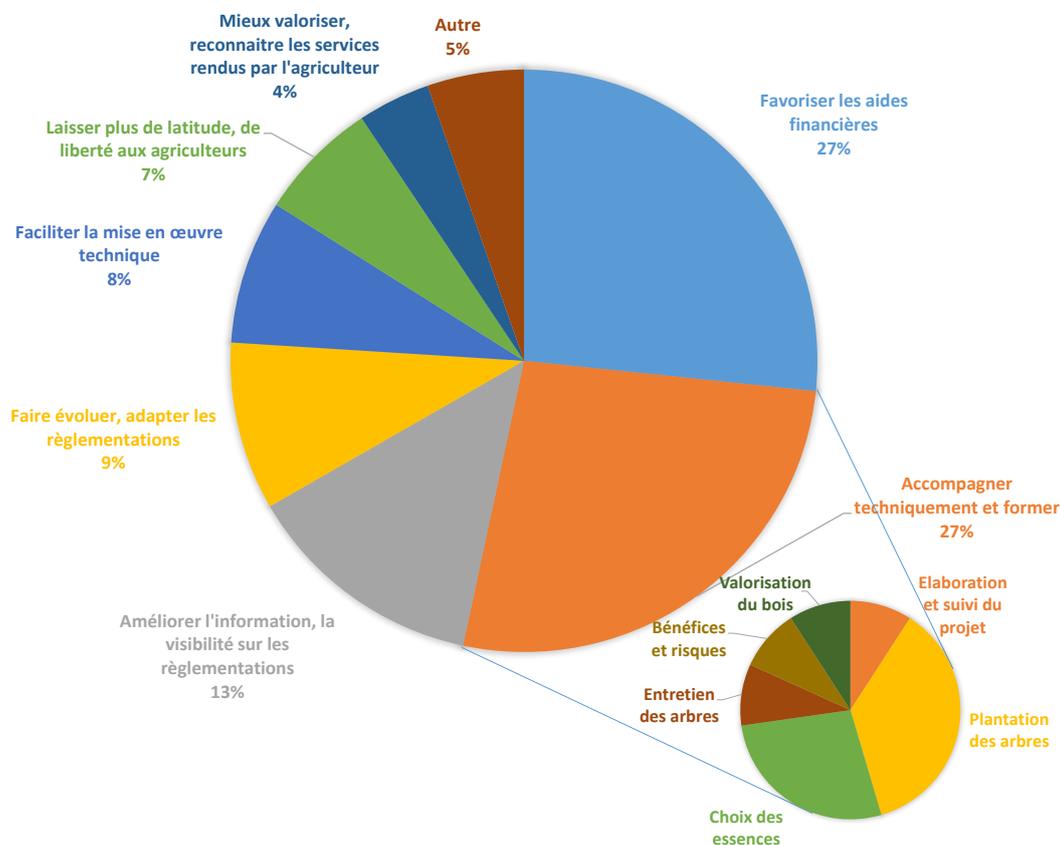


Figure 42. Propositions faites par les exploitants agricoles du Grand-Est pour réduire les limitations au développement de l'agroforesterie dans la région.

Élément à mettre en avant

Des pistes pour mieux accompagner le développement de l'agroforesterie dans le Grand-Est !

Plus de 300 exploitants agricoles du Grand-Est ont répondu aux enquêtes à propos de leurs motivations et réserves pour l'agroforesterie intra-parcellaire. Le financement de la plantation reste un obstacle majeur au développement de ces pratiques au niveau régional, suivi par le manque d'accompagnement technique personnalisé à la plantation et au suivi des projets ainsi que sur les réglementations entourant l'installation d'une parcelle en agroforesterie. Les répondants ont fait des propositions parfois très créatives pour favoriser l'émergence de projet d'agroforesterie intra-parcellaire dans la région.

3.4. Développement des modules biophysiques agroforestiers dans la plateforme de simulation MAELIA et évaluation de scénarios de déploiement des systèmes agroforestiers sur différents territoires

3.4.1. Évaluation des modules de croissance du modèle agroforestier et ajustement de paramètres

3.4.1.1. Rendements des cultures

Les simulations de rendements des cultures par le modèle Yield-SAFE recodé dans MAELIA ont été premièrement confrontées à des rendements potentiels (à dire d'experts). Ces simulations ont été réalisées sur les parcelles de trois territoires en bloquant les effets de la limitation en eau sur la croissance des plantes dans le modèle, afin d'évaluer ou de recalculer les paramètres du

modèle dans ces conditions supposées non limitantes. La figure 43 montre les résultats obtenus en utilisant des paramètres de phénologie par défaut ou modifiés du modèle AqYield de MAELIA (calibré pour la croissance des cultures en France). Suite à l'intégration de ces paramètres de phénologie, des ajustements du paramétrage de l'efficacité d'utilisation du rayonnement par les plantes (RUE, *Radiation Use Efficiency*) ont été réalisés. Ces ajustements ont porté uniquement sur les cultures pour lesquelles suite au paramétrage de la phénologie, les rendements simulés moyens étaient trop hauts ou trop éloignés des rendements potentiels (cas des maïs fourrage et grain et de l'orge d'hiver). Le modèle permet dans ces conditions de s'approcher en moyenne des rendements moyens potentiels, mais certaines cultures comme le blé ou l'orge présentent une grande variabilité de rendements simulés.

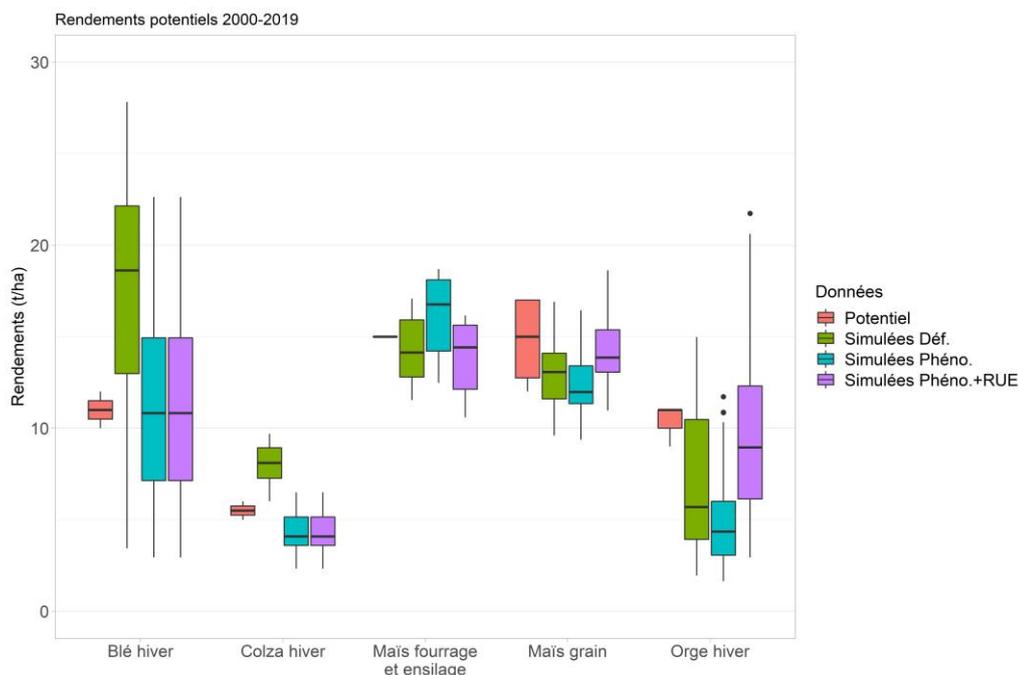


Figure 43. Rendements potentiels des cultures (à dire d'expert) vs simulés par le modèle sans prendre en compte les effets de la limitation en eau, avec les paramétrages par défaut (« Déf. ») ou après intégration et ajustement successif de paramètres relatifs à la phénologie (« Phéno. ») et à l'efficacité d'utilisation des radiations (« RUE »). La variabilité représente les données simulées pour les années 2000 à 2019 sur des parcelles représentatives de trois territoires (Yvelines, Meuse et Haut-Rhin).

Les paramètres par défaut, modifiés pour la phénologie ou ajustés pour la RUE ont ensuite été directement appliqués pour simuler la croissance des cultures en conditions limitantes (i.e. avec prise en compte de l'effet du stress hydrique dans le modèle). Ces simulations ont été comparées à des données de rendements issues de statistiques agricoles à l'échelle des départements français, les données des parcelles de chaque territoire étant comparées aux données de leurs départements respectifs (Figure 44). Les résultats montrent que le paramétrage obtenu après ajustement (phénologie + RUE) est relativement satisfaisant pour les cultures simulées dans les Yvelines (78) : blé d'hiver, colza, maïs grain et orge d'hiver. Les simulations sont cependant un peu plus éloignées des observations pour ces cultures dans les deux autres territoires avec, comme pour les simulations des rendements potentiels, une grande variabilité observée pour les cultures de blé et d'orge. Les simulations du maïs pour fourrage (dans la Meuse) sont proches des observations.

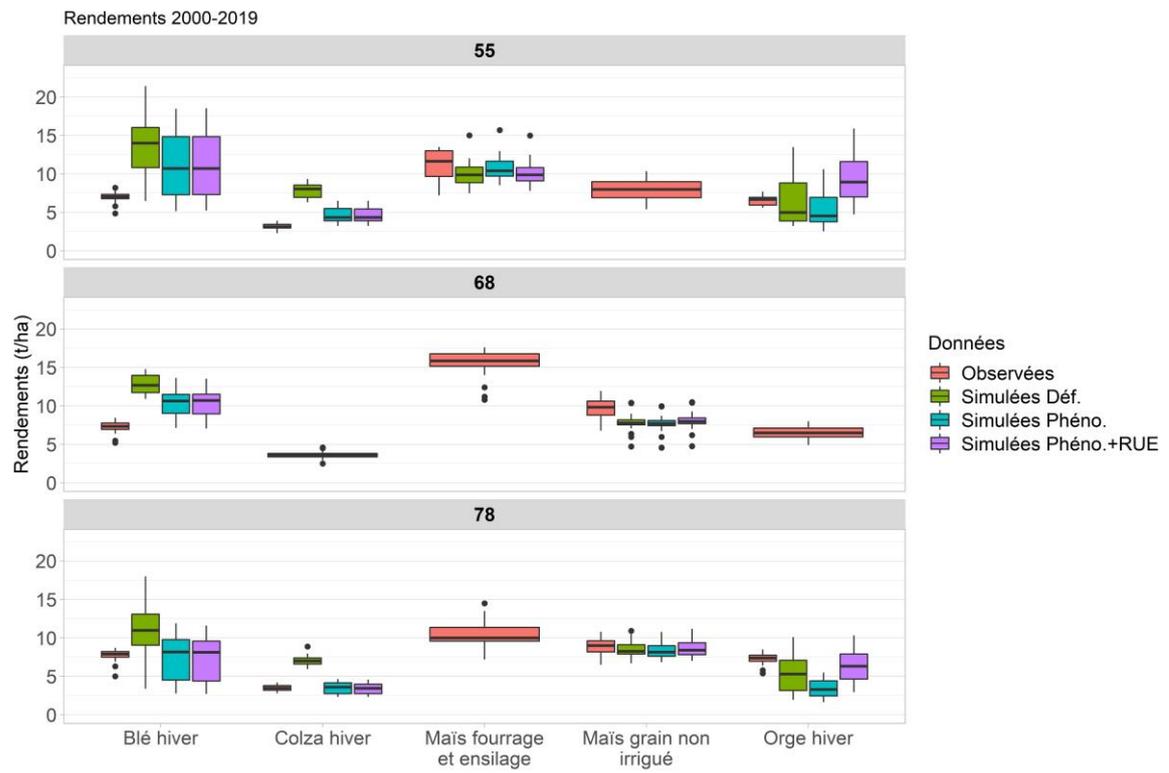


Figure 44. Rendements observés des cultures (statistiques agricoles AGRESTE au niveau départemental) vs. simulés par le modèle avec les paramétrages par défaut (« Déf. ») ou après intégration et ajustement successif de paramètres relatifs à la phénologie (« Phéno. ») et à l'efficacité d'utilisation des radiations (« RUE »), ajustements réalisés sur les rendements potentiels uniquement. La variabilité représente les données simulées pour les années 2000 à 2019 sur des parcelles représentatives de trois territoires (55 = Meuse, 68 =Haut-Rhin et 78 = Yvelines).

3.4.1.2. Biomasses des arbres

La biomasse des arbres simulée par le modèle Yield-SAFE a été comparée à des données de biomasses estimées à partir de mesures de diamètre et de hauteur de diverses essences d'arbres i) sur les sites du premier cercle (une seule date de mesure pour merisier, noyer, pommier et robinier) et ii) sur le site Pilote de la Bouzule (plusieurs dates de mesure sur peuplier). Des données sur d'autres essences ont été récoltées, cependant, en l'absence de paramètres pour ces espèces dans les travaux recensés sur le modèle, ces essences n'ont pas été simulées. Pour les simulations, les paramétrages par défaut ont servi de base pour ajuster, si nécessaire, les paramètres associés à la croissance des arbres. Pour les essences des sites du premier cercle (Figure 45 A et B), seul le merisier n'a pas été re-paramétré, les biomasses simulées étant par défaut soit proches des estimations (Pixérécourt) soit sous-estimées (Banogne, Montenois) ou surestimées (Hennecourt et Orbigny). La RUE des noyer, pommier et robinier a été augmentée pour obtenir des biomasses simulées en moyenne moins biaisées pour l'ensemble des sites. En raison de la variabilité importante des estimations de biomasses, ainsi que des différences de croissance des essences entre sites (e.g. merisier et robinier à Hennecourt vs. Montenois), il apparaît en l'état difficile d'améliorer davantage ces paramétrages pour ces essences.

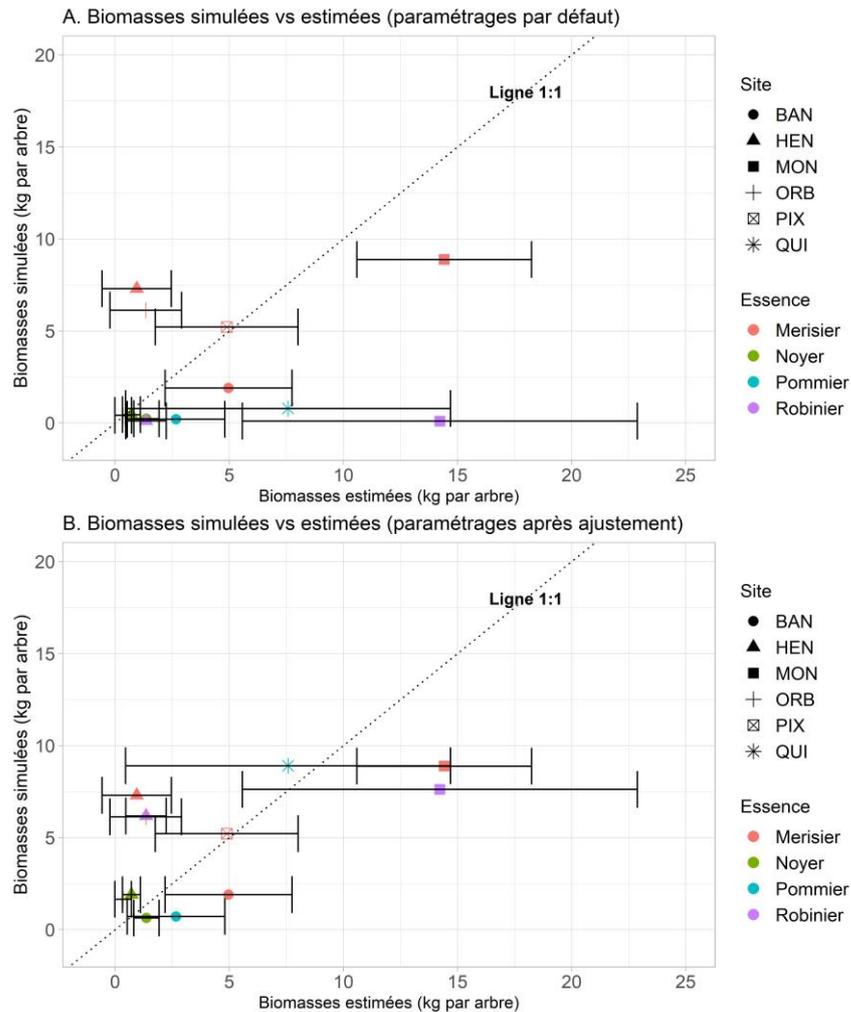


Figure 45. Biomasses ligneuses (en kg de matière sèche par arbre) estimées à partir des diamètres mesurés (méthode de Jenkins et al. 2003) vs. biomasses simulées par le modèle avec des paramètres par défaut (A) ou ajustés (B) pour quatre essences d'arbres étudiées sur les sites du premier cercle (BAN = Banogne, HEN = Hennecourt, MON = Montenois, ORB = Orbigny, PIX = Pixécourt, QUI = Quincey). Les paramètres du merisier n'ont pas été ajustés (B). Les valeurs présentées sont des moyennes de biomasses estimées \pm écart-type (n=12 à 19).

Pour le site Pilote de la Bouzule, la dynamique de croissance des peupliers en agroforesterie sur les sept premières années (2014 à 2021) a été comparée aux simulations réalisées par le modèle (Figure 46). Un léger ajustement de la RUE a permis de mieux simuler cette dynamique en se rapprochant des biomasses estimées par rapport au paramétrage par défaut proposé pour le modèle.

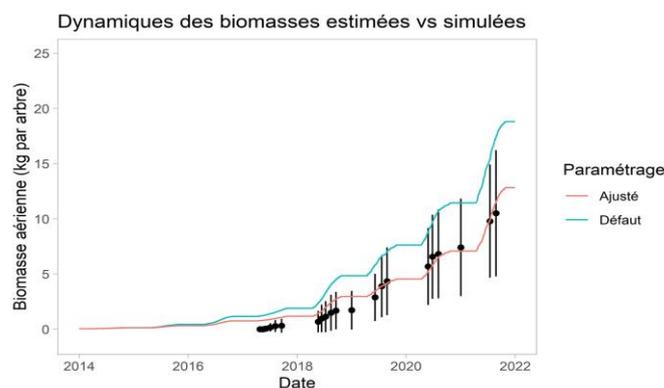


Figure 46. Dynamiques des biomasses ligneuses (en kg de matière sèche par arbre) estimées (points) à partir des diamètres et hauteurs mesurés (équation de Marron et al. 2018) vs. biomasses simulées (courbes) par le modèle avec un paramétrage par défaut ou ajusté pour les peupliers du système agroforestier du site Pilote de la Bouzule. Les valeurs présentées sont des moyennes de biomasses estimées \pm écart-type (n=60).

3.4.2. Scénarios de déploiement de systèmes agroforestiers pour différents territoires du Nord-est de la France

Les paramétrages définis dans la partie précédente (3.4.1) pour les cultures et les arbres ont été utilisés pour évaluer des scénarios de déploiement de systèmes agroforestiers sur les parcelles de trois territoires du ou avoisinant le Nord-Est de la France. Un total de 51 parcelles (agroforestières, en cultures seules ou forestières) a été simulé sur 25 ans. Un exemple de simulation d'une parcelle agroforestière associant une monoculture de maïs grain et des peupliers est présenté Figure 47. Cette simulation prédit une diminution des rendements de la culture au cours du temps (diminution moyenne d'environ 40% après 20 ans), qui retranscrit un effet directement associé à la croissance des arbres, qui vont intercepter une proportion de plus en plus importante des radiations lumineuses. En grandissant, les arbres vont également effectuer des prélèvements plus importants en eau dans le sol, entraînant ainsi une compétition avec la plante pour cette ressource.

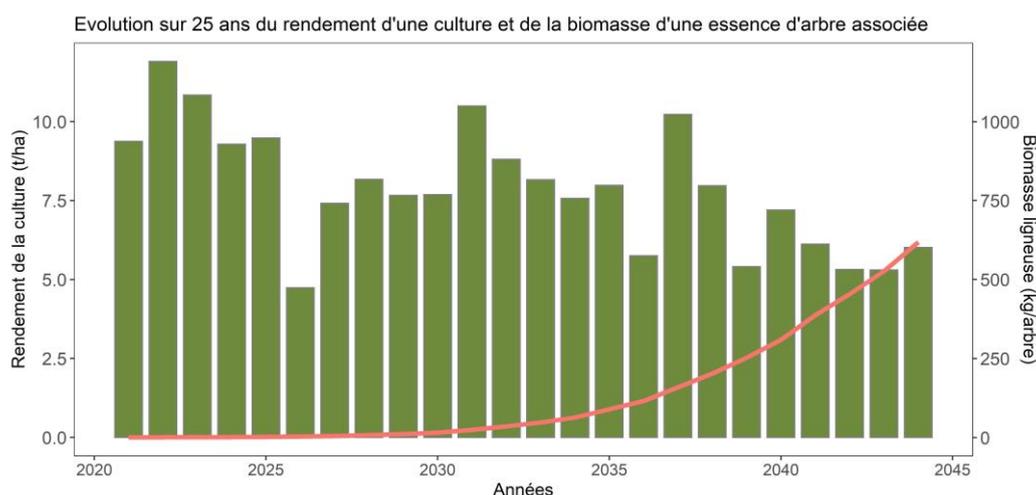


Figure 47. Exemple de simulation sur 25 ans (2020-2044) d'un système agroforestier associant une monoculture de maïs grain (histogrammes en vert) avec des peupliers (densité de 50 arbres/ha ; courbe rouge) sur une parcelle située dans le Haut-Rhin avec un scénario d'évolution du climat RCP 4.5.

La compilation des résultats des scénarios réalisés sur les 51 parcelles est présentée dans la Figure 48 avec l'utilisation du rapport de surface équivalente (LER, Land Equivalent Ratio) comme indicateur d'évaluation. Le modèle prédit un LER supérieur à 1 dans la majorité des situations, suggérant une production supérieure des plantes en association par rapport aux monocultures à surface équivalente. Pour tous les systèmes de cultures et territoires, les LER sont légèrement supérieurs pour les systèmes avec merisier (LER moyen de 1,24) par rapport au peuplier (LER moyen de 1,10). On peut observer des valeurs proches de 1 pour les systèmes agroforestiers en peuplier du territoire du Haut-Rhin (68). Comparativement aux merisiers, les peupliers associés ont une productivité relativement moindre par rapport aux arbres seuls dans ces prédictions faites par le modèle, impactant davantage cet élément du calcul du LER pour les systèmes en peuplier. Les résultats obtenus pour le scénario d'évolution du climat RCP 4.5 sont très proches de ceux que l'on obtiendrait avec le climat actuel, les LER étant en moyenne de 1,24 pour le merisier dans les deux scénarios et respectivement de 1,10 vs 1,09 pour le peuplier. Les LER calculés d'après les simulations sont proches de ceux obtenus dans une étude avec Yield-SAFE en Suisse (Sereke et al. 2015) pour des merisiers dans des systèmes sylvoarables (LER d'environ 1,2 et 1,3 pour des densités de 40 et 70 arbres/ha, respectivement, vs. 50 arbres/ha dans notre étude). Les LER obtenus pour le peuplier sont en revanche un peu inférieurs à ceux obtenus avec le même modèle pour des essais du Sud de la France et du Royaume-Uni (LER = 1.28-1.37) mais avec des densités d'arbres de 139 à 156 arbres/ha pour ces études (Graves et al. 2010). En dehors de ces approches de modélisation, des LER de 1.15 à 1.39 ont été rapportés pour des systèmes sylvoarables au Danemark, en Pologne et au Royaume-Uni (Smith et al. 2022), des LER relativement importants de 1.3 à 1.6 ayant également été calculés pour des noyers sur le site expérimental de Restinclières dans le Sud de la France (Lovell et al. 2018).

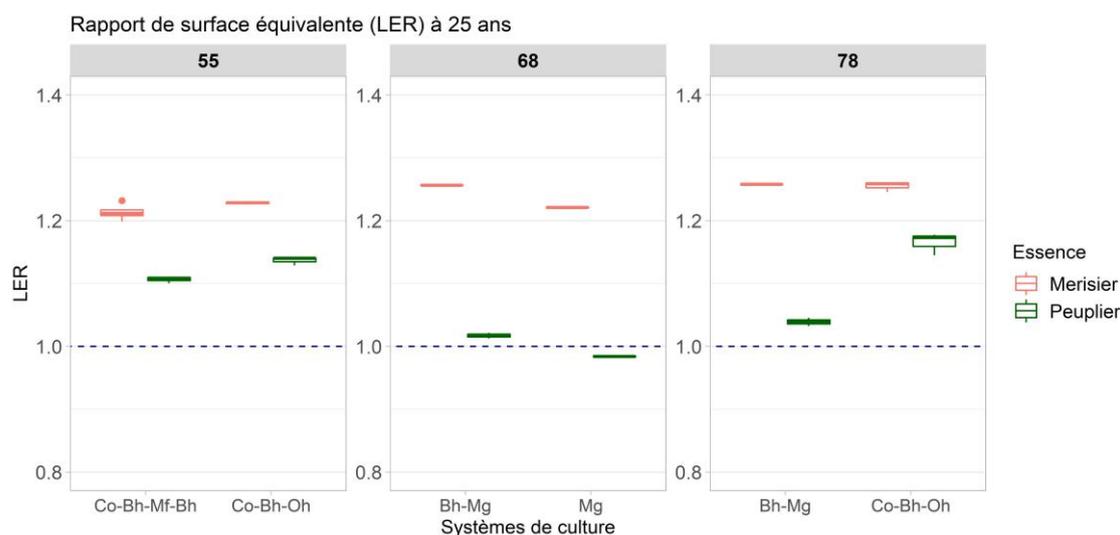


Figure 48. Rapports de surface équivalente (LER = Land Equivalent Ratio) calculés pour différents systèmes agroforestiers simulés sur 25 ans (2020-2044) avec un scénario d'évolution du climat RCP 4.5 et sur des parcelles représentatives de trois territoires (55 = Meuse, 68 = Haut-Rhin et 78 = Yvelines). La variabilité représente les données simulées de parcelles avec un système de culture identique mais décalé dans la rotation (e.g. trois parcelles simulées par année pour chaque élément d'une rotation du type Co-Bh-Oh). Bh = blé d'hiver, Co = colza d'hiver, Mf = maïs fourrage, Mg = maïs grain et Oh = orge d'hiver.

Ces résultats d'évaluation de scénarios dans des territoires contrastés montrent le potentiel de l'intégration du modèle Yield-SAFE dans MAELIA pour évaluer les effets du déploiement de systèmes agroforestiers sur la productivité des systèmes agricoles et le cycle de l'eau au sein des parcelles. Cependant, l'actuel manque de références concernant des systèmes agroforestiers de long terme dans la région, et plus généralement en climat tempéré, induit des incertitudes relativement importantes sur le paramétrage et les sorties de ce modèle agroforestier. De futurs travaux, couplant de nouvelles acquisitions de données et modélisation, permettront d'évaluer et de renforcer les qualités de prédiction à plus long terme des outils de modélisation et d'aide à la décision pour la mise en place de systèmes agroforestiers.

Élément à mettre en avant

Des simulations de surfaces équivalentes assolées (LER) dans la Région très encourageantes !

Pour la Meuse, le Haut-Rhin et les Yvelines (territoires pour lesquels les simulations ont été réalisées), le modèle prédit un LER supérieur à 1 dans la majorité des situations, suggérant une production supérieure des plantes en association par rapport aux monocultures à surface équivalente. Pour tous les systèmes de cultures et territoires, les LER sont légèrement supérieurs pour les systèmes avec merisier (LER moyen de 1,24) par rapport au peuplier (LER moyen de 1,10). Des valeurs proches de 1 sont observées pour les systèmes agroforestiers en peuplier du territoire du Haut-Rhin (68). Comparativement aux merisiers, les peupliers associés ont une productivité relativement moindre par rapport aux arbres seuls dans ces prédictions faites par le modèle, impactant davantage cet élément du calcul du LER pour les systèmes en peuplier.

3.5. Synthèse des indicateurs - Dissémination / Valorisation des résultats auprès des utilisateurs

Un site internet dédié au projet est opérationnel : <https://www6.inra.fr/potage/> (Figure 49). Il permet d'ores et déjà de diffuser les communications et articles traitant de PotA-GE.

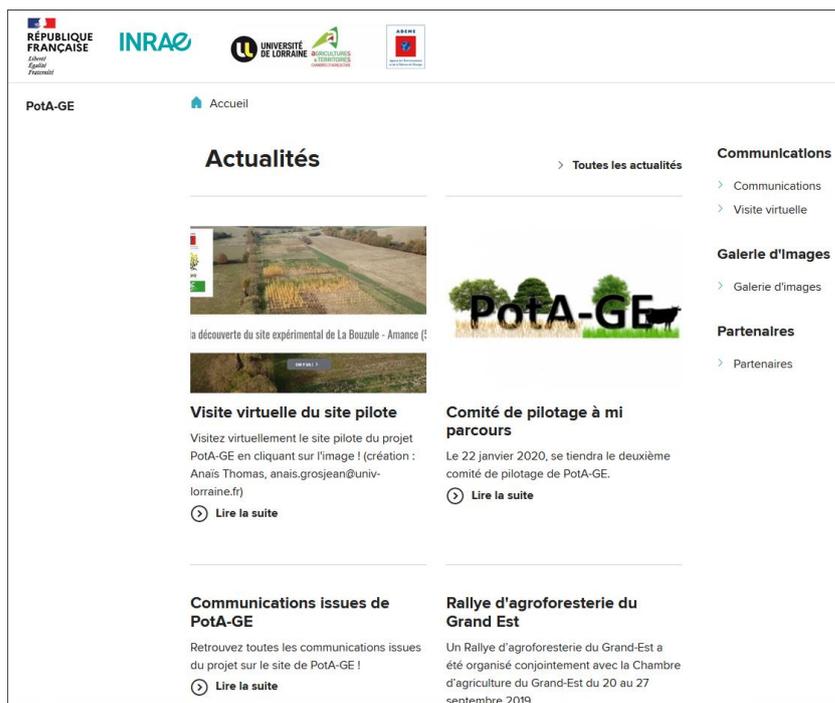


Figure 49. Page d'accueil du site web de PotA-GE.

3.5.1. Valorisation scientifique

Les résultats issus du projet ont déjà fait l'objet de trois publications dans des revues internationales à comité de lecture (Plant and Soil, Forest Ecology and Management et Tree Physiology) ; deux autres sont soumises (voir la liste bibliographique ci-après). Les résultats du projet ont été présentés lors du 4^{ème} congrès mondial d'agroforesterie à Montpellier (France) du 20 au 25 mai 2019, lors du 5^{ème} congrès mondial d'agroforesterie à Québec (Canada) du 17 au 20 juillet 2022, lors du 5^{ème} congrès européen d'agroforesterie (EURAF 2020) à Nuoro en Sardaigne (Italie, finalement online) du 18 au 20 mai 2020, lors du 8^{ème} IUFRO Symposium International du Peuplier (IPS8) à Novi Sad (Serbie, online) du 4 au 6 octobre 2022 et lors des séminaires Croisons les regards du RMT AgroforesterieS en septembre 2018 et 2019 et novembre 2022. Toutes les présentations sont listées dans le point 6 ci-dessous (Références bibliographiques).

3.5.2. Valorisation par la formation

Les données acquises dans le cadre du projet ainsi que le réseau de sites sont d'ores et déjà intégrés dans l'offre de formation de l'Université de Lorraine. Le Master AETPF (Agronomie, Environnement, Territoire, Paysage, Forêt) de l'Université de Lorraine propose en effet une unité d'enseignement en agroforesterie incluant, outre les interventions des partenaires du projet, des travaux pratiques et des visites de certains des sites du projet (Pixérécourt, Montenois, la Bouzule). Les étudiants de 3^{ème} année de la spécialisation DEFI ont travaillé en début du projet sur le référencement des sites agroforestiers dans le cadre d'un parcours thématique (environ 30h équivalent TD). Le site Pilote a été le support de deux projets R et D destinés aux étudiants de 1^{ère} année de l'ENSAIA en 2017 et 2019. Ces projets ont permis la création de deux supports vidéo de 3 minutes sur les bénéfices des systèmes agroforestiers. Depuis septembre 2019, des étudiants de l'IUT d'agronomie de Nancy-Brabois travaillent en interaction avec des membres du projet sur l'organisation d'une journée de terrain dédiée à l'agroforesterie au printemps 2020.

3.5.3. Sensibilisation / Information des agriculteurs

Des manifestations, telles que le Rallye d'agroforesterie du Grand-Est organisé conjointement avec la Chambre d'agriculture du Grand-Est en septembre 2019 et associant la visite d'une vingtaine de plantations agroforestières dans toute la Région à une conférence sur le sujet, permettent de véhiculer le message de PotA-GE auprès des exploitants agricoles et des organismes de formation agricole.

Précédemment, le site Pilote agroforestier du Centre R&D Bouzule a été mis en lumière auprès des apprenants de l'enseignement agricole lors de la finale de l'Agro-écologie Tour Grand-Est, qui s'est déroulée sur la Ferme de la Bouzule le 17 mai 2018 et a réuni plus de 600 lycéens de la Région.

4. Recommandations

Grâce à cette exploration au cœur des projets, nous pouvons dégager quelques éléments structurant le développement des projets ainsi que des points de vigilance.

DES ELEMENTS STRUCTURANTS

- La mobilisation d'une diversité d'acteurs aux compétences et domaines complémentaires.
- La mise en place d'un comité de pilotage technique très constructif dédié au projet.
- L'étude d'une diversité importante de processus à la fois biophysiques et socioéconomiques.
- L'utilisation d'une méthodologie de pointe et extrêmement diversifiée allant d'enquêtes auprès des utilisateurs, à la modélisation de scénarios, en passant par l'analyse laser des flux de gaz à effet de serre.
- L'effet d'ouverture et de levier de PotA-GE pour l'initiation d'autres projets pour approfondir les recherches menées, par exemple le projet FR-eau-MAGE, financé par l'OFB entre 2024 et 2028, qui va continuer à s'intéresser aux sites du 1^{er} cercle définis et caractérisés en grande partie grâce à PotA-GE en se focalisant cette fois-ci, sur l'effet de l'arbre sur le microclimat et le partage de la ressource en eau entre arbres et cultures (et non plus simplement entre arbres et herbacées du linéaire sous-arboré).

DES POINTS DE VIGILANCE

- La grande diversité des processus étudiés en termes d'impact de l'arbre sur la parcelle agricole est un point fort du projet mais c'était également une difficulté pour tous les mener de front et les creuser autant que nous aurions voulu, prévu et dû le faire. D'ailleurs, plusieurs processus initialement prévus à l'étude dans le cadre du projet ont dû être abandonnés en raison de la lourdeur technique qu'ils représentaient par rapport à nos moyens (par ex. les bilans radiatifs dans les parcelles) ou à des problèmes techniques insoupçonnés rencontrés (par ex. la lixiviation des nitrates en raison des caractéristiques de sols lorrains inconciliables avec l'installation des outils). Nous n'abandonnons cependant pas l'idée d'explorer ces processus à l'avenir.
- L'incertitude associée aux effets attendus sur le plus long terme, les parcelles agroforestières suivies étant relativement jeunes. La poursuite des travaux permettra l'acquisition de références pour mieux évaluer ces systèmes et développer en parallèle des outils de modélisation et d'aide à la décision mieux calibrés.
- L'hétérogénéité de l'investissement et de la mobilisation des acteurs. La taille de la région Grand-Est avait également été sous-estimée ; certains départements ont été un peu négligés (par ex. en Alsace, mais aussi en raison d'une faible réactivité des conseillers des Chambres du Haut- et Bas-Rhin à l'époque du lancement des enquêtes de PotA-GE).
- En lien avec le point précédent, les six parcelles du 1^{er} cercle du projet ont été abondamment décrites mais elles restent un échantillon que nous espérons représentatif des parcelles agroforestières du Grand-Est.
- Un cloisonnement institutionnel. Le dialogue entre scientifiques et partenaires en contact avec les filières (les Chambres d'Agriculture) n'est pas toujours évident en raison de façons de travailler très différentes.

5. Conclusion / Perspectives

La relative jeunesse de l'agroforesterie intra-parcellaire dans la région Grand-Est (la parcelle recensée la plus âgée n'a pas plus d'une dizaine d'année en fin de projet en 2022) a pour conséquence que les effets de l'arbre sur certains processus étudiés qui mettent du temps à se mettre en place, tel que le stockage du carbone dans les sols, sont très peu marqués (malgré des tendances allant dans le bon sens, à savoir un enrichissement du sol en carbone organique à proximité des arbres, principalement en profondeur). Par contre, certains processus ont déjà été affectés par la présence des arbres ; c'est le cas par exemple, de l'amélioration du drainage de l'eau par les racines des arbres, d'un partage optimisé de l'eau entre la composante arborée et la composante herbacée du système, d'une réduction des émissions de méthane des sols (dépendant cependant du type d'association d'espèce) ou encore d'une stimulation de la croissance des arbres ou des cultures herbacées lorsqu'ils sont associés à une espèce fixatrice d'azote atmosphérique (respectivement herbacée ou ligneuse). Ces deux derniers effets, observés au site Pilote, ont sans doute été favorisés par le fait que les espèces d'arbre utilisées sont à croissance rapide (peuplier et aulne), accélérant sûrement la mise en place de processus d'interactions positives entre les espèces. Les espèces d'arbres à croissance lente étudiées aux sites du 1^{er} cercle (essentiellement du merisier, à fins de production de bois d'œuvre) occasionne un développement à plus long terme des processus d'interactions, qu'ils soient positifs ou négatifs, entre les arbres et les cultures.

Les suivis réalisés depuis 2018 sur le réseau de parcelles agroforestières du Grand-Est (premier cercle) défini dans le cadre de PotA-GE vont se poursuivre dans le cadre du projet FR-eau-MAGE (« *Figurer la Ressource en eau et le Microclimat des parcelles Agroforestières du Grand-Est* ») financé par l'Office Français de la Biodiversité (OFB) pour la période 2022-2024. Ce nouveau projet se propose d'une part, d'approfondir les travaux entrepris dans PotA-GE sur le partage de la ressource en eau du sol entre arbres et cultures agricoles en équipant les parcelles de sondes pour la mesure de l'humidité du sol plus seulement sur la ligne d'arbres mais également dans la culture / prairie (avec les contraintes de déplacement des instruments lors du passage d'engins pour les travaux agricoles, problème qui ne se posait pas dans PotA-GE où la ligne d'arbre, non travaillée par l'agriculteur, était équipée). D'autre part, FR-eau-MAGE va élargir la gamme des services écosystémiques potentiellement rendus par l'arbre en milieu agricole étudiés dans PotA-GE en s'intéressant à l'effet de l'arbre sur le microclimat (température et humidité de l'air, précipitations). Les six parcelles du réseau sont en cours d'équipement ; les suivis ont débuté pour la plupart d'entre elles.

Au site Pilote, les suivis des flux de méthane et de protoxyde d'azote des sols dans les différents traitements initiés dans PotA-GE vont se poursuivre. Ces suivis ont en effet commencé tardivement dans le cadre du projet en raison de diverses difficultés d'électrification du site Pilote, d'acquisition de l'analyseur, d'ennoyage de la parcelle néfaste pour l'analyseur et interrompant le suivi, etc. De plus, les arbres du site Pilote seront coupés durant l'hiver 2022-2023 pour le démarrage d'une seconde rotation (le peuplier et l'aulne rejettent de souche et peuvent subir plusieurs rotations successives sans remplacement des arbres) ; cette opération nous permettra d'estimer les biomasses de bois réellement produites, de calculer des surfaces équivalentes assolées en comparant les productions réelles des différentes composantes du systèmes dans les mélanges par rapport aux monocultures d'arbres et aux parcelles agricoles en pur à l'échelle de la plantation (nos travaux demeurent encore beaucoup à l'échelle de l'arbre) et de poursuivre le suivi des flux de gaz à effet de serre du sol pour la deuxième rotation du dispositif.

6. Références bibliographiques

Articles scientifiques dans des revues nationales et internationales à comité de lecture

1. THOMAS Anaïs, PRIAULT Pierrick, PIUTTI Séverine, DALLÉ Erwin, MARRON Nicolas. Crown morphology of *Populus deltoides* × *P. nigra* and *Alnus glutinosa* growing in agroforestry and forest mixture plantations. *Agroforestry Systems*. Sous presse.
2. THOMAS Anaïs, PRIAULT Pierrick, DALLÉ Erwin, MARRON Nicolas. Phénologie des bourgeons de l'aulne et du peuplier en plantations mélangées forestière et agroforestière. *Revue Forestière Française*. En cours de révision.
3. THOMAS Anaïs, MARRON Nicolas, BONAL Damien, PIUTTI Séverine, DALLÉ Erwin, PRIAULT Pierrick. 2022. Leaf and tree water-use efficiencies of *Populus deltoides* × *P. nigra* in mixed forest and agroforestry plantations. *Tree Physiology*. In press. DOI: 10.1093/treephys/tpac094
4. THOMAS Anaïs, PRIAULT Pierrick, PIUTTI Séverine, DALLÉ Erwin, MARRON Nicolas. 2021. Growth dynamics of fast-growing tree species in mixed forestry and agroforestry plantations. *Forest Ecology and Management*. 480 DOI: 10.1016/j.foreco.2020.118672
5. CLIVOT Hugues, PETITJEAN Caroline, MARRON Nicolas, DALLÉ Erwin, GENESTIER Julie, BLASZCZYK Nicolas, SANTENOISE Philippe, LAFLOTTE Alexandre, PIUTTI Séverine. 2019. Early effects of temperate agroforestry practices on soil organic matter and microbial enzyme activity. *Plant and Soil*. 453: 189-207. DOI: 10.1007/s11104-019-04320-6

Communications lors de symposiums et congrès internationaux

Communications orales

1. THOMAS Anaïs, MARRON Nicolas, BONAL Damien, PIUTTI Séverine, DALLÉ Erwin, PRIAULT Pierrick. 2022. Leaf and tree water-use efficiencies of *Populus deltoides* × *P. nigra* in mixed forest and agroforestry plantations. 8th IUFRO International Poplar Symposium, NOVI SAD, Serbie (online), 4-6 octobre.
2. THOMAS Anaïs, MARRON Nicolas, BONAL Damien, PIUTTI Séverine, DALLÉ Erwin, PRIAULT Pierrick. 2022. Water-use efficiency of *Populus deltoides* × *P. nigra* in mixed forest and agroforestry plantations. 5th World Congress on Agroforestry, QUEBEC, Canada, 17-20 juillet.
3. PRIAULT Pierrick, THOMAS Anaïs, PIUTTI Séverine, DALLÉ Erwin, MARRON Nicolas. 2022. Species interaction dynamics in fast growing poplar and alder forestry and agroforestry systems: from leaf to tree. 5th World Congress on Agroforestry, QUEBEC, Canada, 17-20 juillet.
4. PLAIN Caroline, MARRON Nicolas, PIUTTI Séverine, DALLÉ Erwin, EPRON Daniel. 2022. Does alley cropping agroforestry with nitrogen-fixing species mitigate greenhouse gas emissions? 5th World Congress on Agroforestry, QUEBEC, Canada, 17-20 juillet.

5. GROSJEAN Anaïs, MARRON Nicolas, PRIAULT Pierrick. 2021. Do agroforestry practices improve tree performance compared to monoculture? Case study of agroforestry plantations including fast-growing species. 5th European Agroforestry Conference, NUORO, Italie (online), 17-19 mai.

Posters

1. PIUTTI Séverine, LE MOUËL Cédric, MARRON Nicolas, DALLÉ Erwin, PRIAULT Pierrick. 2022. Impact of poplar-clover agroforestry system on root traits and microbial communities in controlled conditions. 5th World Congress on Agroforestry, QUEBEC, Canada, 17-20 juillet.
2. PIUTTI Séverine, LAFLOTTE Alexandre, DALLÉ Erwin, GENESTIER Julie, MARRON Nicolas. 2022. Spatial and temporal dynamics of microbial parameters in northeastern French agroforestry systems. 5th World Congress on Agroforestry, QUEBEC, Canada, 17-20 juillet.
3. MARRON Nicolas, PIUTTI Séverine, LACROIX Thomas, COCHARD Patrick, AMIAUD Bernard, CLIVOT Hugues, CUNTZ Matthias, DALLÉ Erwin, EPRON Daniel, LAFLOTTE Alexandre, PETITJEAN Caroline, PLAIN Caroline, THÉROND Olivier. 2019. Evaluation of alley cropping agroforestry potential in northeastern France. 4th World Agroforestry Congress, MONTPELLIER, France, 20-22 mai.
4. CLIVOT Hugues, PETITJEAN Caroline, BLASZCZYK Nicolas, DALLÉ Erwin, GENESTIER Julie, LAFLOTTE Alexandre, MARRON Nicolas, SANTENOISE Philippe, PIUTTI Séverine. 2019. Effect of alley cropping agroforestry on soil microbial communities. 4th World Agroforestry Congress, MONTPELLIER, France, 20-22 mai.
5. CLIVOT Hugues, CUNTZ Matthias, MARRON Nicolas, THÉROND Olivier. 2019. Extending the multi-agent modelling platform MAELIA to support land conversion to agroforestry systems. 4th World Agroforestry Congress, MONTPELLIER, France, 20-22 mai.
6. CLIVOT Hugues, CUNTZ Matthias, MARRON Nicolas, THÉROND Olivier. 2019. Extension de la plateforme de modélisation multi-agents MAELIA pour soutenir le développement de l'agroforesterie. Journée « Croisons les regards » du RMT AgroforesterieS, PARIS, France, 10 septembre.
7. MARRON Nicolas, PIUTTI Séverine, LACROIX Thomas, COCHARD Patrick, AMIAUD Bernard, CUNTZ Matthias, DALLÉ Erwin, EPRON Daniel, LAFLOTTE Alexandre, PETITJEAN Caroline, PLAIN Caroline, THÉROND Olivier. 2018. Évaluer les potentialités de l'agroforesterie dans le Grand-Est de la France – Le projet PotA-GE. Journée « Croisons les regards » du RMT AgroforesterieS, PARIS, France, 7 septembre.

Communications lors de séminaires nationaux

8. MARRON Nicolas. 2022. Évaluer les potentialités de l'agroforesterie dans le Grand-Est de la France : premiers enseignements du projet ADEME PotA-GE. Journée « Croisons les regards » du RMT AgroforesterieS, PARIS, France, 8 novembre.

Rapports de stage

- BERNARD A., BRED A., CREMILLEUX M., DELSAUT L., GODET L., HEGARAT E., LECOQ G., PASCARETTI C. 2018. Évaluer les potentialités de l'agroforesterie dans le Grand-Est de la France – Le projet PotA-GE. Parcours thématique 3A DEFI ENSAIA. UMR LAE (tuteurs : Alexandre Laflotte / Séverine Piutti).

- BITAUD Orane, 2021. Stockage du carbone en parcelles agroforestières. Projet tuteuré de Master 1 AETPF, Université de Lorraine. UMR Silva (tuteur : Nicolas Marron). 17 pages.
- D'ABZAC Julie, 2020. Interactions entre espèces en plantations agroforestières. Projet tuteuré de Master 1 AETPF, Université de Lorraine. UMR Silva (tuteur : Nicolas Marron). 15 pages.
- DUBOIS Zoé, 2022. Interaction entre arbres et cultures pour la ressource en eau du sol en agroforesterie dans la région Grand-Est. Stage de Licence 3, département de géosciences de l'ENS-PSL, Paris. UMR Silva (tuteur : Nicolas Marron). 27 pages.
- FORTIN Ianis, 2020. Effets des systèmes agroforestiers sur des indicateurs de fonctionnement des sols : approche spatialisée. Stage de DUT. UMR LAE (tutrice : Séverine Piutti).
- LEFLON Olivier, 2019. Effets des systèmes agroforestiers sur le fonctionnement microbien du sol. Projet tuteuré de Master 1 AETPF, Université de Lorraine. UMR LAE (tutrice : Séverine Piutti). 14 pages.
- LE MOUËL Cédric, 2021. Effets d'une association agroforestière (peuplier-trèfle) en conditions contrôlées sur les traits racinaires et les communautés microbiennes. Stage de Master 2, Université Paris-Saclay. UMR LAE (tutrice : Séverine Piutti). 37 pages.
- MICHELET Baptiste, 2021. Étude de l'effet de l'arbre sur le fonctionnement du sol dans les agrosystèmes forestiers. Stage de Master 1 AETPF. UMR LAE (tutrice : Séverine Piutti).
- NDIAYE Abdoulaye, 2022. Impact d'un système agroforestier sur le bilan des gaz à effets de serre (CH₄, N₂O, CO₂). Stage de Master 2 AETPF, UMR Silva (tutrice : Caroline Plain). 20 pages.
- QUET Felix, 2021. Étude des interactions interspécifiques dans les plantations agroforestières pour l'accès à la ressource en eau. Projet tuteuré de Master 1 AETPF, Université de Lorraine. UMR Silva (tuteur : Nicolas Marron). 20 pages.
- RETTEL Lorenz, 2022. Effets de la distance à l'arbre sur les communautés microbiennes du sol en systèmes agroforestiers. Stage d'IUT Louis Pasteur, Université de Strasbourg. UMR LAE (tutrice : Séverine Piutti). 36 pages.
- TARDIF Sarah, 2020. Interactions entre espèces dans les plantations agroforestières. Projet tuteuré de Master 1 AETPF, Université de Lorraine. UMR Silva (tuteur : Nicolas Marron). 16 pages.

REFERENCES CITEES

- AFAC. 2021. https://afac-agroforesteries.fr/wp-content/uploads/2021/03/Contribution-concertation-PSN-PAC_Agroforesteries_mars2021.pdf
- Bambrick, A.D., J.K. Whalen, R.L. Bradley, A. Cogliastro, A.M. Gordon, A. Olivier and N.V. Thevathasan. 2010. Spatial heterogeneity of soil organic carbon in tree-based intercropping systems in Quebec and Ontario, Canada. *Agroforestry Systems*. 79: 343-353. DOI: 10.1007/s10457-010-9305-z
- Bamière, L., V. Bellassen, D. Angers, R. Cardinael, E. Ceschia, C. Chenu, J. Constantin, N. Delame, A. Diallo, A.-I. Graux, S. Houot, K. Klumpp, C. Launay, E. Letort, R. Martin, D. Mézière, C. Mosnier, O. Réchauchère, M. Schiavo, O. Théron, S. Pellerin. 2023. A marginal abatement cost curve for climate change mitigation by additional carbon storage in French agricultural land. *Journal of Cleaner Production*. 383. DOI: 10.1016/j.jclepro.2022.135423
- Bandick, A.K. and R.P. Dick. 1999. Field management effects on soil enzyme activities. *Soil Biology and Biochemistry*. 31: 1471-1479.
- Cardinael, R., T. Chevallier, A. Cambou, C. Béral, B.G. Barthès, C. Dupraz, C. Durand, E. Kouakoua and C. Chenu. 2017. Increased soil organic carbon stocks under agroforestry: A survey of six different sites in France. *Agriculture, Ecosystems and Environment*. 236: 243-255. DOI: 10.1016/j.agee.2016.12.011
- Cardinael R, V. Umulisa, A. Toudert, A. Olivier, L. Bockel and M. Bernoux. 2018. Revisiting IPCC Tier 1 coefficients for soil organic and biomass carbon storage in agroforestry systems. *Environmental Research Letters* 13: 124020. doi.org/10.1088/1748-9326/aaeb5f
- Clivot, H., C. Petitjean, N. Marron, E. Dallé, J. Genestier, N. Blaszczyk, P. Santenoise, A. Laflotte and S. Piutti. 2019. Early effects of temperate agroforestry practices on soil organic matter and microbial enzyme activity. *Plant and Soil*. 453: 189-207. DOI: 10.1007/s11104-019-04320-6
- Constantin, J., M. Willaume, C. Murgue, B. Lacroix and O. Therond. 2015. The soil-crop models STICS and AqYield predict yield and soil water content for irrigated crops equally well with limited data. *Agricultural and Forest Meteorology*. 206: 55-68.
- Dawson, J.O., P.J. Dzialowy, G.Z. Gertner and E.A. Hansen. 1983. Changes in soil nitrogen concentration around *Alnus glutinosa* in a mixed, short-rotation plantation with hybrid *Populus*. *Canadian Journal of Forest Research*. 13 DOI: 10.1139/x83-083
- D'Hervilly, C. 2017. Impact du linéaire sous arboré sur les organismes et la fertilité du sol en système agroforestier tempéré [These en préparation, Montpellier, SupAgro]. <http://www.theses.fr/s185816>
- Dupraz, C., and F. Liagre. 2008. *Agroforesterie: des arbres et des cultures*. Editions France Agricole.
- Gianfreda, L. and P. Ruggiero. 2006. Enzyme activities in soil. In *Nucleic acids and proteins in soil* (pp. 257-311). Springer, Berlin, Heidelberg.
- Graves, A.R., P.J. Burgess, J. Palma, K.J. Keesman, W. van der Werf, C. Dupraz ... and M. Mayus. 2010. Implementation and calibration of the parameter-sparse Yield-SAFE model to predict production and land equivalent ratio in mixed tree and crop systems under two contrasting production situations in Europe. *Ecological Modelling*. 221: 1744-1756. DOI: 10.1016/j.ecolmodel.2010.03.008
- Jenkins, J. C., D.C. Chojnacky, L.S. Heath and R.A. Birdsey. 2003. National-scale biomass estimators for United States tree species. *Forest Science*. 49: 12-35.
- Kim, D.-G., M. U. F. Kirschbaum, and T. L. Beedy. 2016. Carbon sequestration and net emissions of CH₄ and N₂O under agroforestry: Synthesizing available data and suggestions for future studies. *Agriculture, Ecosystems & Environment* 226:65-78.
- Lorenz, K., and R. Lal. 2014. Soil organic carbon sequestration in agroforestry systems. A review. *Agronomy for Sustainable Development* 34:443-454.
- Lovell, S.T., C. Dupraz, M. Gold, S. Jose, R. Revord, E. Stanek and K.J. Wolz. 2018. Temperate agroforestry research: considering multifunctional woody polycultures and the design of long-term field trials. *Agroforestry Systems*. 92: 1397-1415. DOI: 10.1007/s10457-017-0087-4
- Luedeling, E., R. Kindt, N. I. Huth, and K. Koenig. 2014. Agroforestry systems in a changing climate - challenges in projecting future performance. *Current Opinion in Environmental Sustainability* 6:1-7.
- Lundgren, B. 1982. Introduction [Editorial]. *Agroforestry Systems* 1:3-6.
- Marron, N., P. Priault, C. Gana, D. Gérant and D. Epron. 2018. Prevalence of interspecific competition in a mixed poplar/black locust plantation under adverse climate conditions. *Annals of Forest Science*. 75: 23-34. DOI: 10.1007/s13595-018-0704-z
- Mead, R. and R. Willey. 1980. The concept of a 'land equivalent ratio' and advantages in yields from intercropping. *Experimental Agriculture*. 16: 217-228.

- Nair, P. K. R., B. M. Kumar, and V. D. Nair. 2009. Agroforestry as a strategy for carbon sequestration. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science-Zeitschrift Fur Pflanzenernahrung Und Bodenkunde* 172:10-23.
- Nair, P. K. R., V. D. Nair, B. M. Kumar, and J. M. Showalter. 2010. Carbon sequestration in agroforestry systems. Pages 237-307 in D. L. Sparks, editor. *Advances in Agronomy*, Vol 108.
- Niknahad-Gharmakher, H., S. Piutti, J.M. Machet, E. Benizri and S. Recous. 2012. Mineralization-immobilization of sulphur in a soil during decomposition of plant residues of varied chemical composition and S content. *Plant and soil*. 360: 391-404.
- Pellerin et al. 2019. Stocker du carbone dans les sols français. Quel potentiel au regard de l'objectif 4 pour mille et quel coût ? Synthèse du rapport d'étude INRA, 114 p.
- Prout, J.M., K.D. Shepherd, S.P. McGrath, G.J.D. Kirk and S.M. Haefele. 2020. What is a good level of soil organic matter? An index based on organic carbon to clay ratio. *European Journal of Soil Science*. DOI: 10.1111/ejss.13012
- Sereke, F., A.R. Graves, D. Dux, J.H. Palma and F. Herzog. 2015. Innovative agroecosystem goods and services: key profitability drivers in Swiss agroforestry. *Agronomy for sustainable development*. 35: 759-770. DOI: 10.1007/s13593-014-0261-2
- Shi, L., W. Feng, J. Xu and Y. Kuzyakov. 2018. Agroforestry systems: Meta-analysis of soil carbon stocks, sequestration processes, and future potentials. *Land Degradation & Development*. 29: 3886-3897. DOI: 10.1002/ldr.3136
- Sinsabaugh, R.L., C.L. Lauber, M.N. Weintraub, B. Ahmed, S.D. Allison, C. Crenshaw, A.R. Contosta, D. Cusack, S. Frey, M.E. Gallo, T.B. Gartner, S.E. Hobbie, K. Holland, B.L. Keeler, J.S. Powers, M. Stursova, C. Takacs-Vesbach, M.P. Waldrop, M.D. Wallenstein, D.R. Zak, L.H. Zeglin. 2008. Stoichiometry of soil enzyme activity at global scale. *Ecology letters*. 11: 1252-1264.
- Smith, J., B. D. Pearce, and M. S. Wolfe. 2012. A European perspective for developing modern multifunctional agroforestry systems for sustainable intensification. *Renewable Agriculture and Food Systems* 27:323-332.
- Smith, L. G., S. Westaway, S. Mullender, B.B. Ghaley, Y. Xu, L.M. Lehmann ... and J. Smith. 2022. Assessing the multidimensional elements of sustainability in European agroforestry systems. *Agricultural Systems*. 197: 103357. DOI: 10.1016/j.agry.2021.103357
- Sparling G.G, M. Vojvodic – Vukovic and L.A. Schipper. 1998. Hot-water soluble C as a simple measure of labile soil organic matter: the relationship with microbial biomass. *Soil Biology Biochemistry*. 30: 1469-1472.
- Strosser, E. 2010. Methods for determination of labile soil organic matter : An overview. *Journal of Agrobiology*. 27: 49-60. DOI: 10.2478/s10146-009-0008-x
- Taillandier, P., B. Gaudou, A. Grignard, Q.N. Huynh, N. Marilleau, P. Caillou, ... and A. Drogoul. 2019. Building, composing and experimenting complex spatial models with the GAMA platform. *GeoInformatica*. 23: 299-322.
- Therond, O., C. Sibertin-Blanc, R. Lardy, B. Gaudou, M. Balestrat, Y. Hong, ... and P. Mazzega. 2014. Integrated modelling of social-ecological systems: The MAELIA high-resolution multi-agent platform to deal with water scarcity problems. 7. International Congress on Environmental Modelling and Software (iEMSs 2014), Jun 2014, San Diego, Californie, United States. 2386 p.
- Thomas, A., P. Priault, S. Piutti, E. Dallé and N. Marron. 2021. Growth dynamics of fast-growing tree species in mixed forestry and agroforestry plantations. *Forest Ecology and Management*. 480 DOI: 10.1016/j.foreco.2020.118672
- Thomas, A., N. Marron, D. Bonal, S. Piutti, E. Dallé and P. Priault. 2022. Leaf and tree water-use efficiencies of *Populus deltoides* × *P. nigra* in mixed forest and agroforestry plantations. *Tree Physiology*. In press. DOI: 10.1093/treephys/tpac094
- Torralba, M., N. Fagerholm, P. J. Burgess, G. Moreno, and T. Plieninger. 2016. Do European agroforestry systems enhance biodiversity and ecosystem services? A meta-analysis. *Agriculture Ecosystems & Environment* 230:150-161.
- Vance, E. D., P.C. Brookes and D.S. Jenkinson. 1987. An extraction method for measuring soil microbial biomass C. *Soil biology and Biochemistry*. 19: 703-707.
- Van der Werf, W., K. Keesman, P. Burgess, A. Graves, D. Pilbeam, L.D. Incoll, ... and C. Dupraz. 2007. Yield-SAFE: A parameter-sparse, process-based dynamic model for predicting resource capture, growth, and production in agroforestry systems. *Ecological Engineering*. 29: 419-433.
- Verchot, L. V., M. Van Noordwijk, S. Kandji, T. Tomich, C. Ong, A. Albrecht, J. Mackensen, C. Bantilan, K. V. Anupama, and C. Palm. 2007. Climate change: linking adaptation and mitigation through agroforestry. *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change* 12:901-918.
- Villalobos, F. J. and E. Fereres. 2016. Principles of agronomy for sustainable agriculture (pp. 443-457). New York, NY, USA: Springer.
- Zhang, X., W. Dong, X. Dai, S. Schaeffer, F. Yang, M. Radosevich, L. Xu, X. Liu and X. Sun. 2015. Responses of absolute and specific soil enzyme activities to long term additions of organic and mineral fertilizer. *Science of the Total Environment*. 536 : 59–67.

INDEX DES TABLEAUX, FIGURES ET ANNEXES

TABLEAUX

- Tableau 1. Distance à l'arbre des sondes dans le LSA des différents sites.
- Tableau 2. Surfaces plantées en agroforesterie (intra-parcellaire et haies) dans le Grand-Est estimées sur la base des réponses aux enquêtes.
- Tableau 3. Cultures et espèces d'arbres pour les systèmes simulés sur les parcelles de trois territoires.
- Tableau 4. Essences recensées sur les parcelles agroforestières intra-parcellaires du Grand-Est.
- Tableau 5. Caractéristiques moyennes des sept parcelles du premier cercle en termes de coordonnées géographiques, de couvert végétal, du sol et en termes de précipitations.

FIGURES

- Figure 1. Articulation des lots du projet PotA-GE, échelles spatiales auxquelles ils seront réalisés et partenaires impliqués.
- Figure 2. Représentation schématique du site Pilote de la Bouzule.
- Figure 3. Disposition des équipements de mesure sur les parcelles du réseau PotA-GE.
- Figure 4. Distance de prélèvement du sol dans la parcelle cultivée.
- Figure 5. Schéma récapitulatif de la dégradation des principaux composés organiques du sol et des enzymes impliquées en lien avec les cycles du carbone, de l'azote, du soufre et du phosphore.
- Figure 6. Répartition des réponses à l'enquête, par commune de la région Grand-Est.
- Figure 7. Typologie des exploitations des répondants à l'enquête (productions et labélisations).
- Figure 8. Intégration du modèle biophysique agroforestier Yield-SAFE dans MAELIA.
- Figure 9. Structuration de la base de données selon 23 critères descriptifs des plantations agroforestières du Grand-Est.
- Figure 10. Nombre de parcelles en agroforesterie intra-parcellaire implantées par années depuis 2007 en région Grand-Est.
- Figure 11. Caractéristiques des exploitations au sein desquelles des parcelles en agroforesterie intra-parcellaire sont installées en région Grand-Est.
- Figure 12. Objectifs de service et de production des exploitants implantant des parcelles agroforestières intra-parcellaires dans le Grand-Est.
- Figure 13. Répartition des projets d'agroforesterie intra-parcellaire dans la région Grand-Est par atelier principal de l'exploitation.
- Figure 14. Localisation et caractéristiques grossières des sites du 1^{er} cercle dans le Grand-Est.
- Figure 15. Rendements des couverts herbacés dans les parcelles agricoles et agroforestières du site Pilote.
- Figure 16. Matière azotée totale et des couverts herbacés dans les parcelles agricoles et agroforestières du site Pilote.
- Figure 17. Évolution temporelle des hauteurs totales des peupliers et aulnes en monoculture, agroforesterie et mélange forestier au site Pilote.
- Figure 18. Valeurs d'efficacité de transpiration à l'échelle de l'arbre et de discrimination isotopique du carbone $\delta^{13}C$ à l'échelle du cerne des peupliers en monoculture, en agroforesterie et en mélange forestier au site Pilote.
- Figure 19. Efficacité d'utilisation de l'azote des peupliers en monoculture, en agroforesterie et en mélange avec de l'aulne au site Pilote.
- Figure 20. Dimensions verticales et horizontales moyennes des houppiers des peupliers en monoculture, en agroforesterie et en mélange avec l'aulne au site Pilote.
- Figure 21. Évolution temporelle des teneurs en eau du sol entre 2018 et 2022 aux sites du 1^{er} cercle à 10 cm et 1 m de profondeur et au pied de l'arbre et à mi-distance entre deux arbres, en parallèle avec les précipitations.

- Figure 22. Évolution des vitesses d'assèchement du sol au printemps et de ré-engorgement du sol en automne lorsque l'on s'éloigne de l'arbre au site de Montenois, à 10 cm et 1 m de profondeur entre 2019 et 2022.
- Figure 23. Évolution des vitesses d'assèchement du sol au printemps et de ré-engorgement du sol en automne en % d'humidité par jour lorsque l'on s'éloigne de l'arbre au site de Hennecourt, à 10 cm et 1 m de profondeur entre 2019 et 2022.
- Figure 24. Niveau de significativité des régressions linéaires associant les pentes d'assèchement du sol aux printemps 2019, 2021 et 2022 et de ré-engorgement aux automnes 2019 à 2021 aux caractéristiques édaphiques, climatiques et du couvert des parcelles du premier cercle.
- Figure 25. Effets de l'introduction des arbres sur les paramètres du sol mesurés 1, 2 et 4 ans après la plantation des arbres au site Pilote.
- Figure 26. Effets de l'introduction des arbres sur la biomasse microbienne (carbonée, azotée et ratio C:N) mesurés 1, 2 et 4 ans après la plantation des arbres au site Pilote.
- Figure 27. Structure des communautés bactériennes dans les modalités agroforestières (aulne-poacées) et agricoles (poacées) en 2014 et 2016 au site Pilote.
- Figure 28. Interpolation par krigeage des teneurs en azote minéral et de l'activité aminopeptidase selon les parcelles : agricole pure ou agroforestière au site Pilote.
- Figure 29. Abondance de bactéries (nombre de copies de 16S par gramme de sol sec) sur le site de Montenois en 2020 en fonction de la distance à l'arbre.
- Figure 30. Evolution du pool de carbone soluble (HWC) et de deux activités enzymatiques respectivement en lien avec les cycles du carbone (BG pour bêta-glucosidase) et de l'azote (LAP pour leucine aminopeptidase) sur le site de Ferreux-Quincey (FQ) en 2020 et 2021 en fonction de la distance à l'arbre.
- Figure 31. ACP réalisée sur les six sites en considérant les variables édaphiques mesurées en 2020 et 2021 en fonction de la distance à l'arbre.
- Figure 32. Flux de méthane et de protoxyde d'azote pour les trois traitements : agricole, agroforestier et forestier.
- Figure 33. Comparaison entre les deux associations (aulne/prairie et trèfle/peuplier) agroforestière et agricole en termes de flux de méthane.
- Figure 34. Stock de carbone des sols des sites du premier cercle en fonction de la profondeur et de la distance à l'arbre.
- Figure 35. Stock de carbone des sols des sites du premier cercle en fonction de la profondeur, toutes distances à l'arbre confondues.
- Figure 36. Différence de stocks de carbone des sols entre le pied de l'arbre et la mi-distance de l'arbre voisin aux sites du premier cercle en fonction de la profondeur.
- Figure 37. Tableau de corrélations de Pearson et plan principal de l'ACP associant les variables descriptives du sol et du couvert aux sites du premier cercle.
- Figure 38. Résultats de la régression linéaire associant le stock de carbone du sol aux caractéristiques du sol et du couvert des parcelles agroforestières du Grand-Est, ainsi qu'à la position sur la parcelle (profondeur et distance à l'arbre).
- Figure 39. Source de financement des projets de plantations d'arbres déjà réalisées dans le Grand-Est.
- Figure 40. Raisons évoquées pour les plantations d'arbres prévues dans le Grand-Est.
- Figure 41. Obstacles à la plantation d'arbres évoqués par les exploitants du Grand-Est.
- Figure 42. Propositions faites par les exploitants agricoles du Grand-Est pour réduire les limitations au développement de l'agroforesterie dans la région.
- Figure 43. Rendements potentiels des cultures (à dire d'expert) vs. simulés par le modèle sans prendre en compte les effets de la limitation en eau avec les paramétrages par défaut (« Déf. ») ou après ajustement successif de paramètres relatifs à la phénologie (« Phéno. ») et à l'efficacité d'utilisation des radiations (« RUE »).
- Figure 44. Rendements observés des cultures (statistiques agricoles AGRESTE au niveau départemental) vs. simulés par le modèle avec les paramétrages par défaut (« Déf. ») ou après ajustement successif de paramètres relatifs à la phénologie (« Phéno. ») et à l'efficacité d'utilisation des radiations (« RUE »), ajustements réalisés sur les rendements potentiels uniquement.
- Figure 45. Biomasses ligneuses estimées à partir des diamètres mesurés vs. biomasses simulées par le modèle avec des paramétrages par défaut ou ajustés pour quatre essences d'arbres étudiées sur les sites du premier cercle.

- Figure 46. Dynamiques des biomasses ligneuses estimées à partir des diamètres et hauteurs mesurés vs. biomasses simulées par le modèle avec un paramétrage par défaut ou ajusté pour les peupliers du système agroforestier du site Pilote de la Bouzule.
- Figure 47. Exemple de simulation sur 25 ans (2020-2044) d'un système agroforestier associant une monoculture de maïs grain avec des merisiers (densité de 50 arbres/ha) sur une parcelle située dans le Haut-Rhin avec un scénario d'évolution du climat RCP 4.5.
- Figure 48. Rapports de surface équivalente (LER = Land Equivalent Ratio) calculés pour différents systèmes agroforestiers simulés sur 25 ans (2020-2044) avec un scénario d'évolution du climat RCP 4.5 et sur des parcelles représentatives de trois territoires (55 = Meuse, 68 = Haut-Rhin et 78 = Yvelines).
- Figure 49. Page d'accueil du site web de PotA-GE.

ANNEXES

- Annexe 1. Paramétrages initiaux et retenus après ajustement du module agroforestier dans MAELIA.
- Annexe 2. Base de données des parcelles agroforestières recensées dans le Grand-Est.
- Annexe 3. Monographies d'une sélection de parcelles agroforestières intra-parcellaire dans le Grand-Est.
- Annexe 4. Évolution des vitesses d'assèchement du sol au printemps et de ré-engorgement du sol en automne lorsque l'on s'éloigne de l'arbre aux sites d'Orbigny-au-Mont et de Pixérécourt, à 10 cm et 1 m de profondeur entre 2019 et 2022.

SIGLES ET ACRONYMES

AB	Agriculture Biologique
ACP	Analyse en Composantes Principales
ADEME	Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Énergie
ADN	Acide DésoxyriboNucléique
AERM	Agence de l'Eau Rhin-Meuse
AETPF	Agronomie, Environnement, Territoire, Paysage, Forêt
AFAC	Association Française des Arbres Champêtres et Agroforesteries
AFPIA	Association pour la Formation Professionnelle dans les Industries de l'Ameublement
AGFORWARD	AGroFORestry that Will Advance Rural Development
AMI	Appel à Manifestation d'Intérêt
ANOVA	Analyse de variance
AOP	Appellation d'Origine Protégée
BCAE	Bonnes Conditions Agricoles et Environnementales
BG	BetaGlucosidase
C	Carbone
CD	Crown Depth
CDA	Chambre Départementale d'Agriculture
CEC	Capacité d'Echange Cationique
CH₄	Méthane
CIRAD	Centre de coopération Internationale en Recherche Agronomique pour le Développement
CO₂	Dioxyde de Carbone
COS	Carbone Organique du Sol
CR	Crown Radius
DBH	Diameter at Breast Height
DDT	Direction Départementale des Territoires
DEFI	filière Développement Durable des Filières agricoles
Δ_{wood}	Discrimination isotopique vis-à-vis du carbone 13 (inversement lié à WUE)
DOI	Digital Object Identifier
DPB	Droits à Paiement de Base
DRAAF	Directions Régionales de l'Alimentation, de l'Agriculture et de la Forêt
ENSAIA	École Nationale Supérieure d'Agronomie et des Industries Alimentaires
ENS-PSL	École Normale Supérieure – Paris Sciences et Lettres
EURAF	European Agroforestry Federation
FCH₄ / FN₂O	Flux de méthane / Flux de protoxyde d'azote
FR-eau-MAGE	Figurer la Ressource en eau et le Microclimat des parcelles Agroforestières du Grand-Est
GES	Gaz à effet de serre
GIEC	Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat
H	Hauteur
H₂O	Eau
HVE	Haute Valeur Environnementale
HWC	Hot Water extractable Carbon
INRAE	Institut National de Recherche pour l'Agriculture, l'Alimentation et l'Environnement
IPS	International Poplar Symposium
ITS	Internal Transcribed Spacer
IUFRO	International Union of Forest Research Organizations
IUT	Institut Universitaire de Technologie

LAE	Laboratoire Agronomie et Environnement
LAP	Leucine AminoPeptidase
LER	Land Equivalent Ratio
LSA	Linéaire Sous Arboré
LULUCF	Land Use, Land-Use Change and Forestry
MAELIA	Modelling of socio-Agro-Ecological system for Landscape Integrated Assessment
MAT	Matière Azotée Totale
MO	Matière Organique
N	Nitrogen / Azote
N₂O	Protoxyde d'azote
NUE	Nitrogen-Use Efficiency
OFB	Office Français de la Biodiversité
P	Probabilité
PAC	Politique Agricole Commune
PC	Principal Component
PCR	Polymerase Chain Reaction
PotA-GE	Potentialités de l'Agroforesterie dans le Grand-Est de la France
RCP	Representative Concentration Pathway
R&D	Recherche et Développement
RMT	Réseau Mixte Technologique
RUE	Radiation-Use Efficiency
S	Soufre
SAFE	Silvoarable Agroforestry for Europe
SIE	Surfaces d'Intérêt Écologique
TOC	Carbone Organique Total
UMR	Unité Mixte de Recherche
WUE	Water-Use Efficiency

ANNEXES

Annexe 1. Paramétrages initiaux et retenus après ajustement du module agroforestier dans MAELIA.

Table S1. Paramètres de Yield-SAFE utilisés dans MAELIA pour les cultures, par défaut et après modifications et ajustements du modèle aux données.

Paramètres	Définitions (anglais)	Unités	Paramétrages par défaut					Paramétrages modifiés				
			Orge d'hiver	Mais fourrage	Mais grain	Colza d'hiver	Blé d'hiver	Orge d'hiver	Mais fourrage	Mais grain	Colza d'hiver	Blé d'hiver
t0	Temperature threshold	°Cd	5	5	8	5	5	0	6	6	0	0
tsumemerge	Temperature sum to emergence	°Cd	57	156	57	79	57	80	80	80	80	80
tsumrb	Tsum at which partitioning starts to decline	°Cd	456	2000	811	500	456	500	2000	815	500	500
tsumre	Tsum at which partitioning to leaves = 0	°Cd	464	2000	1015	1300	464	1300	2000	1015	1450	1300
tsumharvest	Temperature sum to harvest	°Cd	1312	1622	1780	2000	1312	2015	1800	1980	2150	2015
bc0	Initial biomass	g	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10
la0	Initial leaf area	m ² m ⁻²	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1
croppartition 2leaves	Partition to the leaves at emergence	-	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8
epsc	Radiation use efficiency	g MJ ⁻¹	1.34	1.11	1.29	1	1.85	1.85	1	1.4	1	1.85
gammac	Water needed to produce 1 g of biomass	m ³ g ⁻¹	0.00025	0.0003	0.0003	0.0002	0.0002	0.00025	0.0003	0.0003	0.0002	0.0002
hicrop1	Harvest index	g g ⁻¹	0.51	0.96	0.54	0.25	0.51	0.51	0.96	0.54	0.25	0.51
kc	Radiation Extinction Coefficient	-	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7
pfcritc	Critical pF value for crop	log(cm)	2.9	3.2	3.2	3.2	3.2	2.9	3.2	3.2	3.2	3.2
pwpc	Permanent Wilting Point for Crop	log(cm)	4.2	4.2	4.2	4.2	4.2	4.2	4.2	4.2	4.2	4.2
cropsla	Specific leaf area	m ² g ⁻¹	0.005	0.0066	0.0046	0.02	0.005	0.005	0.0066	0.0046	0.02	0.005
Références			1	2	2	1	1					

Réf. 1 : Crous-Duran et al. (2019) Modelling tree density effects on provisioning ecosystem services in Europe. *Agroforestry Systems*, 93(5), 1985-2007.

Réf. 2 : WebYieldSafe http://home.isa.utl.pt/~joaopalma/projects/agforward/webyieldsafe/input/par_crops.xml

Table S2. Paramètres de Yield-SAFE utilisés dans MAELIA pour les arbres, par défaut et après ajustements du modèle aux données observées.

Paramètres	Définitions (anglais)	Unités	Paramétrages par défaut					Paramétrages modifiés			
			Robinie		Merisie			Robinie		Peuplie	
			Pommier	r	Noyer	Peuplier	r	Pommier	r	Noyer	r
doybudburst	The day of year when budburst occurs	1-365(6)	130	125	135	100	100	130	125	135	100
doyleaffall	The day of year when leaves fall	1-365(6)	290	310	281	300	300	290	310	281	300
SLA	Specific leaf area	cm ² g ⁻¹	50	168	168	100	168	50	168	168	100
epst	Radiation use efficiency	g MJ ⁻¹	1	0.482	0.3	1.3	0.5626	1.9	1	0.5	1.05
gammat	Water use efficiency	m ³ g ⁻¹	0.00031	0.0002	0.0002	0.00025	0.0002	0.00031	0.0002	0.0002	0.00025
kta	Parameter A for radiation extinction coefficient	m ²	10	10	10	10	10	10	10	10	10
ktb	Parameter B for radiation extinction coefficient	-	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4
lamax	Maximum leaf area	m ² /tree	100	250	250	223.4	500	100	250	250	223.4
labsmax	Maximum leaf area for a single bud	m ²	0.0035	0.025	0.03	0.05	0.05	0.0035	0.025	0.03	0.05
ratiotimber	Ratio of timber to total biomass	0-1	0.65	0.15	0.3	0.694	0.35	0.65	0.15	0.3	0.694
ratiobranches	Ratio of branches to total biomass	0-1	0.35	0.85	0.18	0.306	0.65	0.35	0.85	0.18	0.306
wooddensity	Wood density	g m ⁻³	610000	800000	562000	411000	608000	610000	800000	562000	411000
pfcritt	Critical pF value for tree, above which tree starts to drought induction	log(cm)	4	4	4	1.8	4	4	4	4	1.8
pwpt	pF for permanent wilting point	log(cm)	4.2	4.2	4.2	4.2	4.2	4.2	4.2	4.2	4.2
treetau	Number of days after budburst to reach 63.2% of final leaf area	days	10	10	10	10	10	10	10	10	10
nshoots0	Initial number of shoots	nb	2.2	0.252	1	0.6225	0.5713	2.2	0.7	1	0.6225
biomass0	Initial biomass	g/tree	50	50	50	50	50	50	50	50	50
lat0	Initial leaf area of the tree	m ² /tree	0.5	0	0.5	0	0.5	0.5	0	0.5	0
Références			1	2	1	3	3				
Références gammat			1	2	1	4	5				

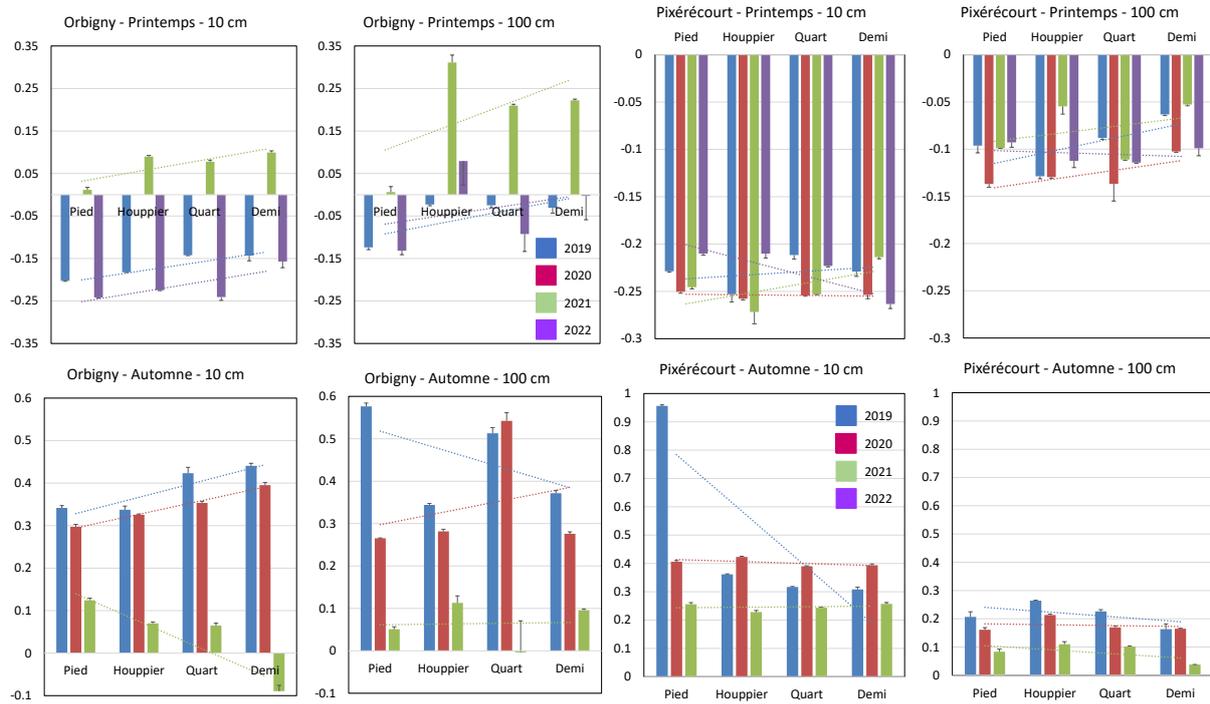
Réf. 1 : Palma et al. (2017). Modelled agroforestry outputs at field and farm scale to support biophysical and environmental assessments. AGFORWARD report WP6.

Réf. 2 : Seserman et al. (2018). Simulating Climate Change Impacts on Hybrid-Poplar and Black Locust Short Rotation Coppices. Forests, 9(7), 419.

Réf. 3 : WebYieldSafe http://home.isa.utl.pt/~joaopalma/projects/agforward/webyieldsafe/input/par_trees.xml

Réf. 4 : Thomas et al. (2022). Leaf and tree water-use efficiencies of *Populus deltoides* × *P. nigra* in mixed forest and agroforestry plantations. Tree Physiology, 42(12), 2432-2445.

Réf. 5 : Valeur dérivée de EcoYieldSafe <http://www.isa.ulisboa.pt/proj/ecoyieldsafe/#/dashboard>



Annexe 4. Évolution des vitesses d'assèchement du sol au printemps (en haut) et de ré-engorgement du sol en automne (en bas) en % d'humidité par jour lorsque l'on s'éloigne de l'arbre (du pied à la demi distance à l'arbre moyen) aux sites d'Orbigny-au-Mont et de Pixérécourt (parcelle n°2), à 10 cm et 1 m de profondeur entre 2019 et 2022. Les droites de tendances sont indiquées pour chaque année. Moyennes \pm erreurs standards, n = 3 directions de mesure dans le sol.

L'ADEME EN BREF

À l'ADEME - l'Agence de la transition écologique -, nous sommes résolument engagés dans la lutte contre le réchauffement climatique et la dégradation des ressources.

Sur tous les fronts, nous mobilisons les citoyens, les acteurs économiques et les territoires, leur donnons les moyens de progresser vers une société économe en ressources, plus sobre en carbone, plus juste et harmonieuse.

Dans tous les domaines - énergie, économie circulaire, alimentation, mobilité, qualité de l'air, adaptation au changement climatique, sols... - nous conseillons, facilitons et aidons au financement de nombreux projets, de la recherche jusqu'au partage des solutions.

À tous les niveaux, nous mettons nos capacités d'expertise et de prospective au service des politiques publiques.

L'ADEME est un établissement public sous la tutelle du ministère de la Transition écologique et du ministère de l'Enseignement supérieur, de la Recherche et de l'Innovation.

LES COLLECTIONS DE L'ADEME



FAITS ET CHIFFRES

L'ADEME référent : Elle fournit des analyses objectives à partir d'indicateurs chiffrés régulièrement mis à jour.



CLÉS POUR AGIR

L'ADEME facilitateur : Elle élabore des guides pratiques pour aider les acteurs à mettre en œuvre leurs projets de façon méthodique et/ou en conformité avec la réglementation.



ILS L'ONT FAIT

L'ADEME catalyseur : Les acteurs témoignent de leurs expériences et partagent leur savoir-faire.



EXPERTISES

L'ADEME expert : Elle rend compte des résultats de recherches, études et réalisations collectives menées sous son regard.



HORIZONS

L'ADEME tournée vers l'avenir : Elle propose une vision prospective et réaliste des enjeux de la transition énergétique et écologique, pour un futur désirable à construire ensemble.



Projet PotA-GE : Potentialités de l'agroforesterie dans le Grand-Est

Le projet PotA-GE a permis d'évaluer le potentiel de l'agroforesterie intra-parcellaire en région Grand-Est en se basant sur un état des lieux de l'existant et sur la documentation d'indicateurs de performances aussi variés que les rendements, les services environnementaux potentiellement rendus par ces systèmes, leur impact sur le fonctionnement et la fertilité des sols, le partage des ressources, les motivations et leviers pour ces pratiques, etc.

Malgré des effets prometteurs de l'introduction de l'arbre en milieu agricole, par exemple sur le partage de la ressource en eau, la jeunesse des plantations régionales a pour conséquence une faible influence de l'arbre sur des processus dont la mise en place peut être longue, comme le stockage du carbone dans les sols ou les flux de gaz à effet de serre.

Le projet a également permis d'adapter la plateforme MAELIA (<http://maelia-platform.inra.fr/>) pour simuler des systèmes agroforestiers intra-parcellaires.

L'essentiel à retenir

- L'agroforesterie intra-parcellaire est en train de se développer spectaculairement dans le Grand-Est.
- Le potentiel de ces plantations reste pourtant modéré en raison de la jeunesse des arbres agroforestiers dans la région (moins de 10 ans) mais les tendances, que ce soit en termes biophysiques et socio-économiques sont encourageantes.

