



UNIVERSITÉ
DE LORRAINE



RÉPUBLIQUE
FRANÇAISE
*Liberté
Égalité
Fraternité*



Margaux Malige

2021/2022

Rapport de stage

Caractérisation physico-chimique des sols en systèmes agroforestiers bocagers et intra-parcellaires Breton

4 avril 2022 – 10 juin 2022

Master 1 Agro sciences, Environnement, Territoires, Paysages, Forêt (AETPF)
Spécialité Ecosystèmes Agricoles et Forestiers (ECOSAFE)

Romane Mettauer, Olivier Godinot, Edith Le Cadre

Remerciements

Je remercie particulièrement et sincèrement Romane Mettauer, ma tutrice de stage, pour m'avoir donné l'opportunité de participer à ce travail de recherche. Je lui suis très reconnaissante pour le temps consacré et les précieux conseils dispensés spécifiquement lors de la rédaction de ce mémoire. Chacun de nos échanges au travail ou autour d'un verre m'a aidé à enrichir mes connaissances et ma perception. Sa bonne humeur, sa présence, son encadrement, nos échanges m'ont permis de réaliser ce mémoire dans un environnement de travail stimulant et bienveillant.

Je remercie également Monsieur Olivier Godinot ainsi que Madame Edith Le Cadre pour l'attention qu'ils m'ont portée. Leurs conseils, les réponses à mes interrogations et la relecture de mes travaux ont été précieux pour faire progresser mon mémoire.

Je voudrai exprimer ma gratitude envers l'ensemble des techniciens du laboratoire et des personnes nous ayant aidé à réaliser la partie terrain. Les travaux se sont réalisés dans la bonne humeur, sous un temps pas toujours clément, avec des discussions toujours intéressantes en particulier lors du tri de vers de terre. Un grand merci aussi à Monsieur Christian Guémené, l'agriculteur qui nous a permis de réaliser les échantillonnages sur ses parcelles.

Enfin, une pensée chaleureuse à l'ensemble du personnel de l'UMR SAS pour leur accueil, l'ambiance sympathique et conviviale notamment au moment de la pause déjeuner qui m'ont permis de me parfaire au tarot !

Table des matières

| | |
|---|----|
| Introduction..... | 5 |
| Matériels et méthodes | 7 |
| Description du site..... | 7 |
| Plan d'échantillonnage..... | 8 |
| Mesure des caractéristiques des sols..... | 9 |
| Variables la porosité du sol | 9 |
| Variables sur le microclimat du sol..... | 10 |
| Caractéristiques chimiques du sol..... | 10 |
| Analyses statistiques | 11 |
| Résultats | 11 |
| Vue générale des variables mesurées sur les deux parcelles agroforestières..... | 11 |
| Influence du type d'agroforesterie sur la qualité du sol | 12 |
| Influence de la position à l'arbre..... | 13 |
| Discussion | 15 |
| Considérations préliminaires sur le jeu de données | 15 |
| Différences entre types d'agroforesterie | 16 |
| Différence de position (A, B et C) | 17 |
| Croisement des effets du type d'agroforesterie et de la position | 19 |
| Conclusion et perspectives..... | 19 |
| Annexe..... | 20 |
| Bibliographie..... | 23 |
| Résumé :..... | 29 |

Abréviation :

AF : Agroforesterie ;

AFB : Parcelle en agroforesterie bocagère étudiée ;

AFip : Agroforesterie intra parcellaire ;

AFIP : parcelle agroforestière étudiée ;

BM : Biomasse ;

DA : Densité apparente ;

%H : pourcentage d'humidité ;

N : azote ;

Nmintot : Quantité d'azote minérale totale ;

R : Taux de recouvrement ;

Tmoy : Température moyenne ;

VDT : Abondance de vers de terre.

Introduction

L'intensification des pratiques agricoles dans les années 1960 à 1980 a induit une perte de biodiversité, une pollution des eaux, et une dégradation des sols (Meynard 2013, Altieri et Nicholls 2020). En réponse à ces impacts, une agriculture plus respectueuse de l'environnement se développe en Europe basée sur les interactions écologiques, ou agroécologiques. Ce terme désigne la diversification des systèmes afin de valoriser les processus biologiques pour pouvoir couvrir à la fois des attentes de production agricole et d'autres services écosystémiques des agrosystèmes (Caquet et al. 2019, Gliessman et al 1998). Les services écosystémiques sont les avantages que les humains peuvent tirer des écosystèmes (Millennium Ecosystem Assessment 2005). Ainsi l'agroécologie se pose comme un levier pour assurer la production agricole tout en réduisant l'utilisation des intrants et en préservant les sols et l'eau (Asfaux 2016). De nombreuses pratiques y sont associées, comme la diversification des assolements, l'allongement des rotations ou encore l'introduction de biodiversité au sein des parcelles à l'exemple de l'agroforesterie (AF).

L'AF est un mode d'exploitation des terres agricoles associant des arbres et des cultures ou des pâturages (Newman 1997). Les pratiques associant l'arbre, les cultures et l'élevage sont très anciennes et multiples, ainsi une diversité de systèmes agroforestiers marque les paysages européens, les paysages français n'y faisant pas exception (Ministère de l'Agriculture, de l'Agroalimentaire et de la Forêt 2015, Den Herder 2017). De nombreux systèmes agroforestiers tempérés ont été recensés (Den Herder 2017) ; ils sont généralement catégorisés par leurs composantes -animal/arbres ou cultures/arbres- (Sinclair 1999). De ce fait, trois groupes principaux s'en dégagent : agrosylviculture (cultures et arbres), sylvopastoralisme (pâturages/animaux et arbres) et agrosylvopastoralisme (cultures, pâturages/animaux et arbres) (Nair 1985).

L'intensification de l'usage des terres agricoles a entraîné des changements de pratiques agricoles vers des pratiques plus mécanisées, ce qui a entraîné une diminution des surfaces agroforestières. Selon Pointereau et Coulon (2006) les surfaces de bocage, une forme d'AF historiquement très présente en France, se sont érodées de près de 70% depuis la fin de son apogée (1850-1930). Le bocage est formé d'une rangée d'arbres en bord de parcelle créant des délimitations entre les prairies ou cultures dans le paysage par des haies, avec ou sans talus (Office Français De La Biodiversité 2021). Ce type d'agroforesterie peut se rapprocher de la forêt par son mode de gestion avec par exemple avec la haie de futaie régulière/irrégulière ou la haie de taillis (AFAC-Agroforesteries 2017). Historiquement, le bocage se concevait comme une forme spécifique d'organisation de l'espace rural. Il permettait de protéger les cultures en

empêchant l'entrée du bétail sur les champs cultivés (Carpentier 2008, Labant 2017). Cependant depuis les années 1950, la modernisation de l'agriculture s'est traduite par la spécialisation des systèmes de production (Caquet et al 2020), ainsi le bocage a connu un recul sans précédent au profit d'un remembrement des terres et d'une intensification de l'élevage (Arbousse-Bastide 2006).

Une autre forme d'AF prend de l'ampleur en France et en Europe. Il s'agit de l'AgroForesterie intra parcellaire (AFip) qui se caractérise par la plantation de rangées d'arbres au sein d'une parcelle créant ainsi une alternance de rangs d'arbres et d'allées cultivées sur une même parcelle (MacFarland 2017)

A l'heure actuelle, ces différentes formes d'AF connaissent un regain d'intérêt pour l'ensemble des services écosystémiques qu'ils rendent : des services d'approvisionnement (production de nourriture, filtration de l'eau, production de fibres, combustibles et autres matières premières), des services de régulation et de soutien (maintien des sols par les racines, modification de la disponibilité en eau du sol, filtration de l'air...) ou encore des services sociaux et culturels. Ainsi, les haies et l'AFip jouent un rôle dans la disponibilité des nutriments par les dépôts de litière, mais également par le lessivage le long du tronc, et des branches, et des racines (Zhang 1999). Des effets sont aussi visibles sur le microclimat du sol : les arbres permettent de réguler la température et la vitesse du vent et ainsi protéger les cultures d'un assèchement ou de la verse (Sanchez et Mc Collin 2015). Des effets bénéfiques de l'AF sont également constatés sur le fonctionnement du sol plus ou moins proche des arbres à l'images des résultats observés sur la séquestration du carbone (Cardinael 2015) ou le fonctionnement d'assemblages biotiques (Boinot 2019, Battie-Laclau 2020, D'Hervilly 2020). Des travaux ont également montré un gradient d'amélioration de la qualité des sols de l'allée cultivée vers les arbres en AFip (Guillot 2021).

La qualité du sol est un terme régulièrement utilisé lorsque l'on parle d'agroécologie. Il s'agit de « la capacité d'un sol à fonctionner en maintenant la productivité biologique, la qualité de l'environnement et la santé des plantes et des animaux » (Doran et Parkin 1994). Cette notion est basée sur l'études de multiples indicateurs qui permettent d'identifier et de quantifier les perturbations, les transformations du sol et les impacts sur les écosystèmes (Bispo 2009). L'étude de la qualité du sol en systèmes agroforestiers des milieux tempérés est de plus en plus renseignée, cependant ces résultats sont très dépendants des conditions et de pratiques locales (Cardinael 2020). A notre connaissance peu de références ont été établies en Bretagne. Pourtant il s'agit d'une région pleine d'enjeux de par de nombreuses problématiques environnementales, économiques et sociales liées à sa spécialisation territoriale en élevage ; et

de par son attachement culturel fort à l'agroforesterie sous forme de haies bocagères (Thenail, et al. 2017, Toullec 2019).

La présente étude s'inscrit dans le cadre d'une thèse portée sur la régulation du cycle de l'azote par les systèmes agroforestiers en contexte de changement climatique en Bretagne. Le travail de stage vient en appui d'un volet s'intéressant aux relations entre la présence d'arbres (systèmes intra-parcellaires et haies bocagères) et différentes caractéristiques du sol expliquant le fonctionnement de la nitrification. Mon travail a été de caractériser la qualité du sol en systèmes agroforestiers bretons par l'étude de certaines caractéristiques physico-chimiques et selon deux facteurs : (i) le système agroforestier (haies bocagères -forme historique sur le territoire- versus intra-parcellaire -forme émergente sur le territoire-); et (ii) la distance à l'arbre.

Nous faisons alors les hypothèses suivantes :

- Certaines propriétés du sol répondent différemment en fonction de la distance à l'arbre.
- De par un modèle de plantation différent (densité, diversité d'essences, répétition à l'échelle de la parcelle) et des gestion différentes (fauche sous les arbres, taille des arbres), les haies et l'agroforesterie intra-parcellaire favorisent des propriétés de sols différentes à l'échelle de la parcelle agricole.

Au cours de ce stage j'ai été amenée à faire de nombreuses mesures dans deux parcelles agroforestières : l'une avec des haies bocagères, l'autre avec de l'agroforesterie intra-parcellaire. Dans le cadre de la thèse, un nombre important de répétitions étaient nécessaires, le travail de terrain a par conséquent été très important car les données acquises seront utilisées dans une modélisation par équations structurales nécessitant un nombre de répétition très important. Cependant par contrainte de temps, pour le stage je me suis concentrée sur l'analyse physico-chimique et statistique d'un sous-jeu de données uniquement, représentant 47% des points échantillonnés (84 points sur 180).

Matériels et méthodes

Description du site

Le site d'étude est situé au lieu-dit Les Noés (47°45'36.3"N 1°54'54.0"W) à Saint-Just, à 50 km au sud de Rennes en Bretagne (France). La température annuelle moyenne y est de 11,9 °C avec 737mm de précipitation de moyenne (Climate Data 2022). Le sol est peu profond (30cm de profondeur en moyenne) avec pour type de sol du limon sur schiste, un pH (KCl) moyen de 5,5. L'étude a été réalisée sur deux parcelles agroforestières d'une exploitation agricole d'une cinquantaine d'hectares spécialisée en bovin lait en agriculture biologique. Les deux parcelles

agroforestières, l'une avec une haie bocagère et l'autre en intra-parcellaire, ont été plantées respectivement en 2012 et en mars 2014. Les parcelles présentent une topographie avec une légère pente (6 % pour la parcelle en agroforesterie intra-parcellaire (AFIP) et 10% pour la parcelle en agroforesterie bocagère (AFB)). Les haies et rangs d'arbres y sont orientés sur un axe Nord-Sud afin d'avoir le même ensoleillement de chaque côté des rangs et ainsi ne pas impacter la production des cultures annuelles et prairies temporaires qui y sont implantées (**Figure 1**).

L'AFB a une superficie de 1,8 ha. La haie est plurispécifique et est composée d'un arbre de haut jet tous les 4 mètres avec entre ces arbres de haut jet trois arbustes espacés de 1 mètre, soit un arbre ou arbuste par mètre. Les arbres ont une hauteur moyenne de 4,9 mètres et une circonférence moyenne de 21,54 cm (**Annexe I**). Les essences qui la composent sont : *Viburnum opulus*, *Populus tremula*, *Fraxinus*, *Rhamnus frangula*, *Acer campestre*, *Prunus avium*, *Crataegus*, *Malus sylvestris*.

L'AFIP a une superficie de 2,1 ha, elle comporte 3 rangées d'arbres. Les arbres sont séparés de 6m et l'espacement entre chaque rangée est de 27 mètres (densité 50 arbres/ha). La hauteur moyenne des arbres est de 4,8 mètres et avec une circonférence moyenne de 19,4 cm (**Annexe I**). La parcelle comporte 6 essences : *Juglans regia*, *Castanea crenata*, *Fraxinus*, *Tilia cordata*, *Sorbus domestica* et *Prunus avium*. Contrairement à la haie, les rangées d'arbres sont fauchées chaque année, à l'exception de 2021/2022.

Aujourd'hui, le système de culture sur ces deux parcelles est similaire : il consiste en une rotation sur 5 ans avec 4 ans de prairie temporaire composée de ray gras (*Lolium spp.*) et de trèfle violet (*Trifolium pratense*), puis une année en association céréale-protéagineux. Avant la plantation des arbres, les parcelles avaient le même système de rotation. Les cultures sont destinées à la fauche et au pâturage. En début de saison les parcelles sont en fauche puis après 2 fauches, elles sont mises en pâturage. Les rendements de la prairie sont d'environ 6t/ha/an. Le sol est fertilisé avec du lisier avant les fauches et avec du compost à l'automne. Les arbres sont taillés ponctuellement afin de récupérer le bois pour l'utiliser en bois de chauffage.

Plan d'échantillonnage

Les mesures sur le terrain et des échantillonnages de sol ont été effectués en avril 2022. Sur la parcelle en AFIP, deux essences ont été étudiées : les cormiers ainsi que les frênes. Il s'agit des essences les plus vigoureuses et dans les meilleures conditions sanitaires. Pour chaque essence, 7 arbres ont été retenus. Sur l'AFB, 14 arbres ont été retenus. La haie étant plurispécifique, ces arbres sont d'une grande diversité d'essences. Pour chacun des arbres, des mesures concernant le microclimat du sol, sa porosité, certaines caractéristiques biogéochimiques ainsi que la

biomasse végétale aérienne ont été mesurées à trois emplacements par rapport à la rangée d'arbres : (i) le premier au sein même de la rangée, entre les 2 arbres (A) – à 0,5m direction sud - ; (ii) le second à la bordure entre la prairie et la rangée d'arbre (B) – à 1,50m de A à l'Est de la parcelle - ; et (ii)le troisième dans la prairie (C) – à 10m de A également à l'Est de la parcelle - (Fig 1). Etant peu impacté par les arbres (Guillot, et al. 2021), nous considérerons le point C comme le point témoin agricole pour cette étude. C'est donc 84 points d'échantillonnage qui ont été étudiés (14 arbres x 3 positions x 2 parcelles).

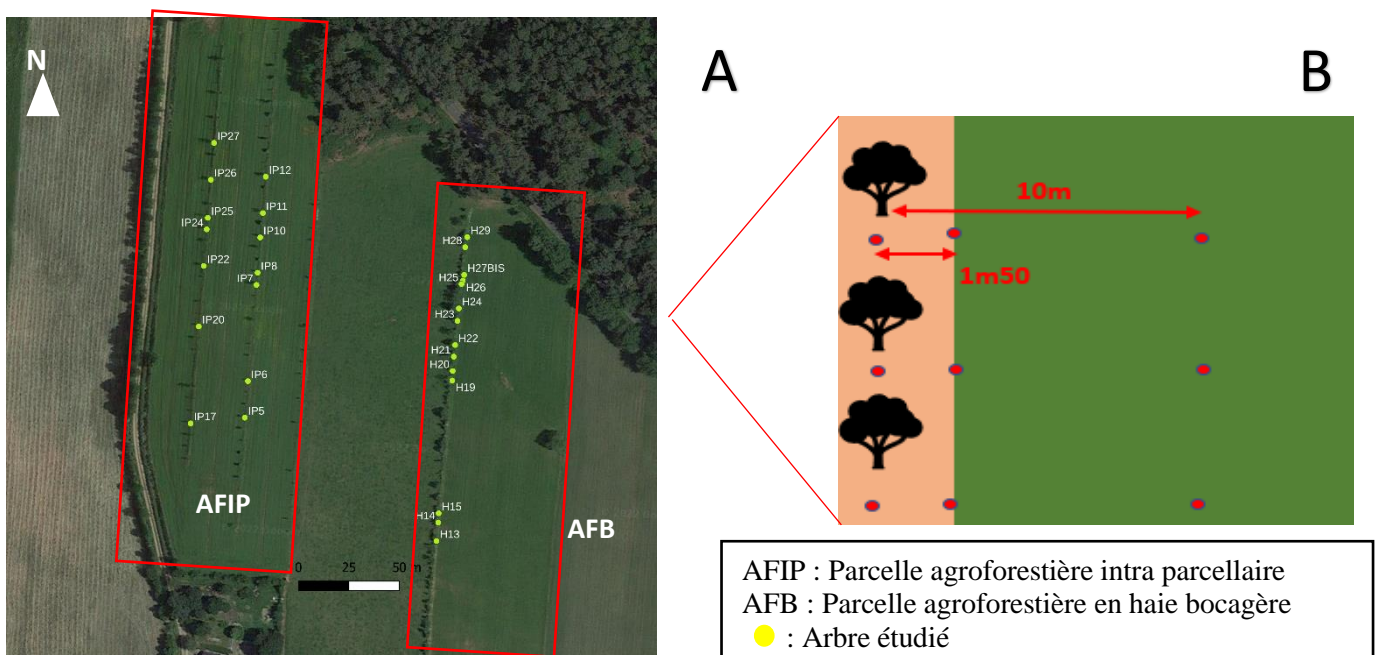


Figure 1 : (A) Sous échantillon des points en parcelle AFIP et AFB. (B) Gradient de prélèvements des points sur les parcelles AFIP et AFB.

Mesure des caractéristiques des sols

En chaque point A, B et C, un ensemble de 8 variables ont été récoltées et analysées. L'abondance des vers de terre (VDT), la densité apparente (DA), l'humidité du sol (%H), la température moyenne (Tmoy), le taux de recouvrement (R), la biomasse végétale (BM), le pH et les formes d'azote minéral du sol (NminTot). La pluviométrie a également été relevée afin de pouvoir expliquer certaines variables.

Variables la porosité du sol

Abondance de vers de terre (VDT) : Les vers de terre ont été collectés sur tous les points sélectionnés des deux parcelles. Un cube de sol (25 x 25 x 30cm, longueur x largeur x profondeur) a alors été prélevé puis trié manuellement par différents observateurs pour prélever

tous les individus, lors de l'activité biologique maximum des vers de terre (Cardinael et al. 2019). Puis l'abondance de vers de terre à été calculée selon l'équation 1 :

$$VDT (\text{nb.m}^{-2}) = ABDvdt * 16 \text{ (équation1)}$$

Avec ABDvdt : Abondance des vers de terre pour une surface de 25 x 25 cm

Densité apparente (DA) : Des échantillons de sol ont été prélevés sur chaque point d'échantillonnage de la surface jusqu'à une profondeur de 30 cm à l'aide d'une tarière à densité. Après séchage à l'air libre, les carottes de sol ont été placées à l'étuve à 105°C pendant 24h afin d'éliminer toute l'humidité. La densité apparente a été calculée (équation 2) comme le rapport de la masse sèche au volume du cylindre (Yoro et Godo 1990).

$$DA = \frac{Ms}{V} \text{ (Équation 2)}$$

Avec : Ms : Masse sèche du sol en g ; V : Volume du cylindre en cm³

Variables sur le microclimat du sol

Humidité du sol (%H) : L'humidité (équation 3) a été mesurée conjointement avec les mesures de densité apparente par les mesures de masses humides et sèches des échantillons prélevés.

$$\%H = \frac{Mh - Ms}{Ms} \text{ (Équation 3)}$$

Avec : Mh : masse humide du sol en g ; Ms : Masse sèche du sol en g.

Température Moyenne (TMoy) : Lors du prélèvement du bloc de sol pour l'abondance de vers de terre, la température a été relevée sur chaque face du bloc à l'aide d'un thermomètre. Les 4 mesures ont ensuite été moyennées pour obtenir la température moyenne.

Taux de recouvrement du sol (R) et biomasse végétale (BM) : Le taux de recouvrement du sol (R) et la biomasse (BM) ont été mesurés au même moment. La mesure du taux de recouvrement s'est faite sur une surface de 25 x 25 cm à chaque point d'échantillonnage. Elle exprime le rapport entre la surface couverte par la végétation et la surface totale du relevé (Delassus 2015). Il s'agit d'une estimation visuelle par la méthode de Braun-Blanquet (Meddour 2011) . Cette valeur est donnée en pourcents. La biomasse a été mesurée sur la même surface. Elle a été déterminée par la méthode de récolte intégrale qui consiste à récolter toute la matière végétale sur pied (coupe à ras du sol) (Levang et Grouzis 1980). Une fois récoltée, la masse des échantillons (g) est obtenue après séchage à l'étuve à 60°C pendant 48h.

Caractéristiques chimiques du sol

Lors du prélèvement du cube de sol pour l'abondance des vers de terres environ 1,5 kg de sol a été prélevé. Cela a permis de réaliser des analyses sur les caractéristiques chimiques en chaque point de chaque parcelle.

pH: Le pH a été mesuré selon la norme ISO10390 (1994). 10g de sol sec tamisé à 2mm ont été mis en suspension dans 50ml de KCl 1M puis mis sous agitation pendant 5 minutes. Après étalonnage à un tampon 4 puis à 7, un pH-mètre a permis de prendre les mesures de pH de chaque échantillon.

Azote minéral (N_{mintot}): Le principe est de mesurer l'azote disponible après extraction selon le protocole ISO14256-2. L'analyse quantitative de la solution est effectuée en laboratoire. Ainsi, un échantillon de 50g de sol frais tamisé à 2 mm a été introduit dans 100mL de solution de KCl 1M, puis agité pendant une heure avec un agitateur automatique et laissé reposer à nouveau une heure. L'azote minéral (mgN.kg⁻¹sol) a été par la suite dosé par analyseur séquentiel. Les résultats ont pu être ajustés avec l'humidité pondérale du sol. (Mayard et Karla 1993)

Analyses statistiques

Toutes les analyses statistiques ont été réalisées à l'aide du logiciel R (R Development Core Team, 2008, R 3.6.1). Une analyse multivariée a été réalisée à l'aide de l'analyse en composantes principales (ACP) pour laquelle l'ensemble des dimensions avec des valeurs propres supérieures à 1 ont été retenues (package FactoMineR ; Husson, et al. 2020). Par la suite les effets du type agroforestier et de la position ont été explorés pour sur les moyennes de chaque variables par des ANOVA à 2 facteurs lorsque les conditions d'indépendance (test de Durbin-Watson - Fox 2016), de normalité résiduelle (test de Shapiro-Wilk - Royston 1982) et d'homoscédasticité (test de Bartlett - Bartlett 1937) étaient vérifiées, et par un test de Kruskal-Wallis (Hollander et Wolfe 1973) sinon. Lorsque des résultats significatifs ont été obtenus ($p < 0,05$), un test post-hoc a été réalisé selon la méthode de Tukey après ANOVA, ou la méthode de Bonferroni après les tests de Kruskal-Wallis.

Résultats

Vue générale des variables mesurées sur les deux parcelles agroforestières

Les statistiques descriptives réalisées sur l'ensemble des variables étudiées montrent une forte variabilité du jeu de donnée (**Tableau 1**). Ainsi concernant le microclimat :la température du sol sur les deux parcelles varie de 4,8°C, allant de 8,8°C à 13,6°C avec une moyenne de 10,6°C. L'humidité varie de 18% à 43%. Les deux parcelles présentent une abondance de vers de terre très hétérogène allant de 0 à 864 vers par m² pour une moyenne de 342 vers/m². De même pour la densité apparente ainsi que pour la biomasse (respectivement min = 0,94 ; max = 1,5 et min = 11,91 ; max = 88,15). Le taux de recouvrement était majoritairement de 100%, il y a très peu de variabilité, cette variable a donc été écartée pour la suite des analyses statistiques.

Le pH moyen des deux parcelles étudiées est acide (moyenne de 5,45) avec une forte variabilité pour une telle variable (min = 4,8 et max = 5,7). De même, les valeurs d'azote minéral (N-min) varient fortement allant de 0,44 mgN.kg⁻¹ à 2,28 mgN.kg⁻¹ avec une moyenne de 0,91 mgN.kg⁻¹.

L'humidité du sol est corrélée négativement à la densité apparente et au pH (seuil de corrélation : -0,5 et -0,75). Le pH est également corrélé négativement à la température moyenne. Enfin la biomasse est corrélée négativement à la densité apparente (**Figure 2**).

Tableau 1 : Description des variables étudiées (Min ; 1^{er} Q. ; Médiane ; Moyenne ; 3^e Q. ; Max). Tmoy : Température moyenne (en °C) ; %H : pourcentage d'humidité ; R : Recouvrement (en %) ; BM : biomasse (en g) ; VDT : abondance de vers de terre (nb.m⁻²) ; DA : densité apparente ; Nmintot : quantité d'azote minéral total (mgN.kg⁻¹) ; Hauteur (en m) et DBH : circonférence du tronc à hauteur de poitrine (en cm)

| | <i>Tmoy</i> | <i>%H</i> | <i>R (%)</i> | <i>BM</i> | <i>VDT</i> | <i>DA</i> | <i>pH</i> | <i>Nmintot</i> |
|----------------------|-------------|-----------|--------------|-----------|------------|-----------|-----------|----------------|
| <i>Minimum</i> | 8,8 | 0,1817 | 75 | 11,91 | 0 | 0,9394 | 4,67 | 0,4422 |
| <i>1^e</i> | 8,75 | 0,2797 | 100 | 21,33 | 224 | 1,1157 | 5,220 | 0,7304 |
| <i>Quartile</i> | | | | | | | | |
| <i>Médiane</i> | 10,35 | 0,3085 | 100 | 29,12 | 312 | 1,2280 | 5,390 | 0,8289 |
| <i>Moyenne</i> | 10,616 | 0,3091 | 98,41 | 33,66 | 342,2 | 1,2127 | 5,382 | 0,9065 |
| <i>3^e</i> | 11,375 | 0,3347 | 100 | 41,26 | 464 | 1,3035 | 5,560 | 1,0601 |
| <i>Quartile</i> | | | | | | | | |
| <i>Maximum</i> | 13,6 | 0,4287 | 100 | 88,15 | 864 | 1,4869 | 5,960 | 2,2849 |

Influence du type d'agroforesterie sur la qualité du sol

L'ACP réalisée sur l'ensemble des variables de qualité du sol révèle 3 dimensions avec des valeurs propres supérieures à 1 : ces dimensions 1, 2 et 3 expliquent respectivement 23,38%, 21,68% et 20,80% de la variabilité du jeu de donnée.

La première dimension est construite sur les variables pH (significativement positif) et humidité du sol (%H, significativement négatif). Cette dimension permet d'observer une discrimination entre les individus en fonction du type agroforestier ; l'effet agroforesterie intra parcellaire étant corrélé positivement à la dimension 1 et l'effet haie négativement (**Figure 3**). Cet effet est également retrouvé dans la dimension 3 qui est construite sur les variables température moyenne (Tmoy) ainsi que l'azote minéral total (Nmintot) (significativement positifs). Cette discrimination du type d'agroforesterie se retrouve dans l'analyse univariée de différentes variables. Ainsi, le type d'agroforesterie (H et IP) a un effet significatif (p<0.05) sur de nombreuses variables décrivant des conditions environnementales (**Tableau 1**) telles que la densité apparente (DA), l'humidité du sol (%H), la température moyenne (Tmoy), le pH ainsi que la quantité de N minéral total (Nmintot). La densité apparente sur la parcelle en haie bocagère (AFB) est significativement inférieure de 7,2% à celle de la parcelle en agroforesterie

intra-parcellaire (AFIP) (respectivement 1,17 et 1,26 de DA moyenne). C'est également le cas pour le pH qui est significativement plus acide sur la parcelle AFB (5,3 contre 5,5 pour la parcelle AFIP soit 3,7% plus acide). A l'inverse, la quantité totale de N minérale est significativement supérieure de 19% en AFB qu'en AFIP. Concernant les données du microclimat du sol, l'humidité ainsi que la température moyenne sont significativement supérieures dans la parcelle en agroforesterie bocagère qu'en agroforesterie intra-parcellaire.

Influence de la position à l'arbre

La seconde dimension de l'ACP est construite sur les variables biomasse (significativement positif) et la densité apparente (significativement négatif). Elle permet de discriminer l'effet de la position par rapport au rang d'arbres A, B et C (**Figure 3**). L'analyse univariée de certaines variables met en lumière cet effet position. Ainsi, le facteur position a un effet significatif sur certaines variables telle que la densité apparente, la biomasse et le pH. L'effet position se remarque particulièrement entre la position au sein de la rangée d'arbre (A) et les positions dans la prairie (B et C) (**Figure 3**). La densité du sol (DA) ainsi que la biomasse (BM) sont similaires en position B et C et significativement différentes avec le point A. La densité est plus faible (-15,4%) et la biomasse plus élevée (+ 54,7% par rapport au point B et +49,1% par rapport au point C) au point A. Concernant le pH, une différence significative est notable au point entre la culture et la rangée d'arbres (B) où le sol est significativement plus acide que sur les deux autres positions (de 5,5% plus acide que le point A et 3,8% pour le point C) (**Tableau 2**).

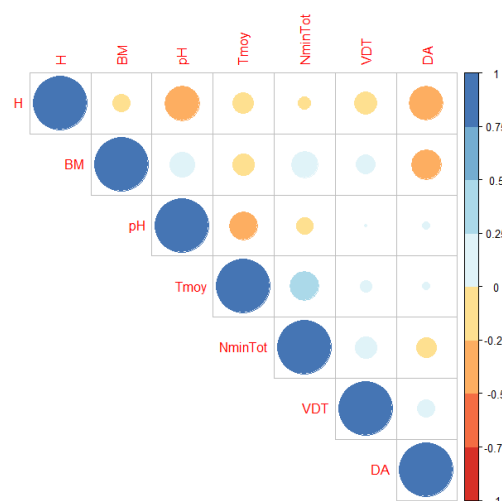


Figure 2 : Matrice de corrélation des différentes variables quantitatives. Les corrélations positives sont affichées en bleu et les corrélations négatives en rouge. L'intensité de la couleur et la taille des cercles est proportionnelle aux coefficients de corrélation.

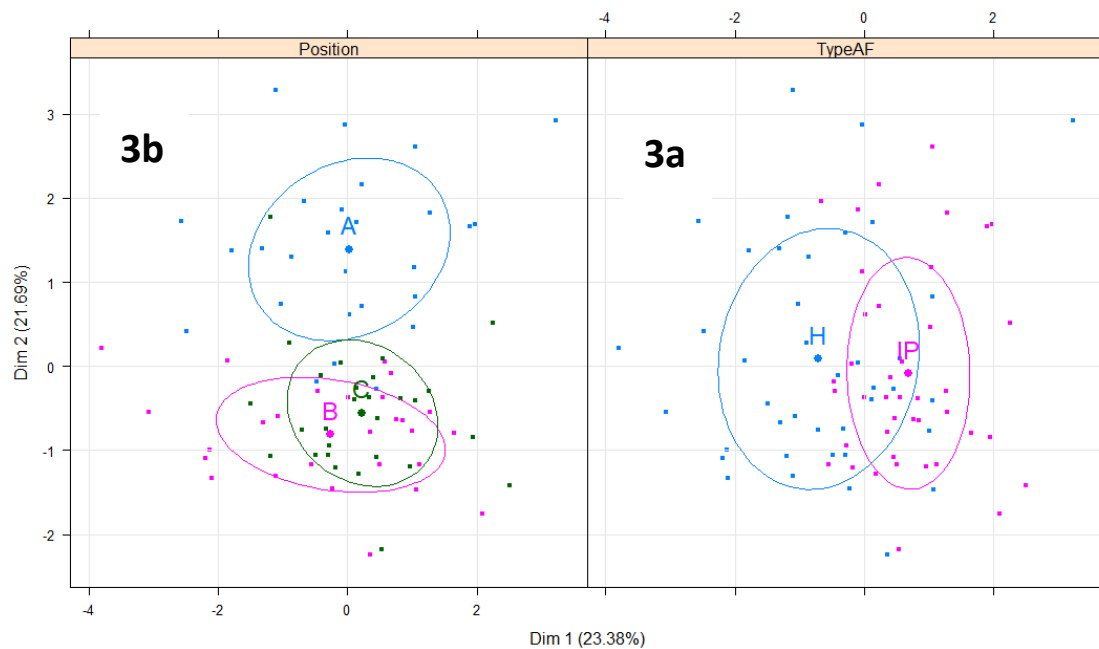


Figure 3 : Graphique des individus et corrélation entre les différentes positions (A, B ou C) et pour le type d'agroforesterie (AFB et AFIP) sur les dimensions 1 et 2. 3a) H : en bleu, parcelle de la haie bocagère ; IP : en rose, parcelle en agroforesterie intra-parcellaire. 3b) A : en bleu, le point au sein de la rangée d'arbre ; B : en rose, point à 1m50 de l'arbre ; C : en vert, point à 10m de l'arbre.

Tableau 2 : Variables de la qualité du sol étudiées (moyennes (\pm écart-type)) selon les types d'AF et les positions. Les effets des espèces et des facteurs de position ont été testés à l'aide d'un modèle linéaire (¹ : ANOVA ; ² : Kruskal-Wallis). Les seuils de significativité des tests sont indiqués comme suit : ns pour $p > 0,05$; * : $0,05 > p > 0,01$; ** : $0,01 > p > 0,001$; *** : $p < 0,001$. Les différences significatives sont indiquées avec les lettres en caractères gras VDT : Abondance de Vers de Terre ; DA : densité du sol ; %H : humidité du sol ; Tmoy : Température Moyenne ; BM : Biomasse ; NminTot : Azote minéral total. Les graphiques des barplots sont visibles en annexe II.

| | <i>H</i> | <i>IP</i> | <i>P-value</i> <i>Type AF</i> | <i>A</i> | <i>B</i> | <i>C</i> | <i>P-value</i> <i>Position</i> | <i>p-value :</i> <i>Position:TypeAF</i> |
|-----------------------------|-------------------------------------|-------------------------------------|----------------------------------|-------------------------------------|-------------------------------------|-------------------------------------|-----------------------------------|--|
| ¹ <i>VDT</i> | 334,40 ($\pm 150,55$) a | 349,71 ($\pm 193,38$) a | ns | 344,89 ($\pm 152,87$) a | 384,00 ($\pm 155,19$) a | 299,43 ($\pm 198,41$) a | ns | ns |
| ¹ <i>DA</i> | 1,16 ($\pm 0,11$) a | 1,26 ($\pm 0,11$) b | *** | 1,11 ($\pm 0,08$) a | 1,26 ($\pm 0,1$) b | 1,27 ($\pm 0,1$) b | *** | ns |
| ¹ <i>%H</i> | 0,33 ($\pm 0,05$) a | 0,29 ($\pm 0,03$) b | *** | 0,31 ($\pm 0,05$) a | 0,31 ($\pm 0,05$) a | 0,31 ($\pm 0,04$) a | ns | ns |
| ² <i>Tmoy</i> | 11,25 ($\pm 1,17$) a | 10,01 ($\pm 0,54$) b | *** | 10,38 ($\pm 1,02$) a | 10,86 ($\pm 1,23$) a | 10,61 ($\pm 1,00$) a | ns | ns |
| ¹ <i>BM</i> | 33,25 ($\pm 18,90$) a | 34,05 ($\pm 16,82$) a | ns | 51,47 ($\pm 18,8$) a | 23,32 ($\pm 7,00$) b | 26,21 ($\pm 8,63$) b | *** | ns |
| ¹ <i>pH</i> | 5,27 ($\pm 0,32$) a | 5,49 ($\pm 0,21$) b | *** | 5,48 ($\pm 0,29$) a | 5,23 ($\pm 0,29$) b | 5,44 ($\pm 0,25$) a | *** | ** |
| ¹ <i>NminTot</i> | 1,00 ($\pm 0,4$) a | 0,81 ($\pm 0,16$) b | ** | 1,00 ($\pm 0,39$) a | 0,84 ($\pm 0,19$) a | 0,88 ($\pm 0,31$) a | ns | ns |

Discussion

Considérations préliminaires sur le jeu de données

Les particularités de cette étude sont (i) une campagne de terrain ponctuelle et impliquant un grand nombre de personnes et (ii) la localisation de l'étude sur un site unique. En effet, le site d'étude se situe en Bretagne dans des conditions climatiques et pédologiques particulières, les résultats trouvés sont spécifiques à ce site et peuvent différer par rapport à d'autres régions. En ce sens de nombreux auteurs appuient la nécessité d'étudier les systèmes agroforestiers dans différentes zones géographiques afin de pouvoir tirer des conclusions généralisables par zone climatique similaire (Cardinael 2020) or a notre connaissance aucune étude similaire n'a été réalisée dans le Nord-Ouest de la France. Ainsi, bien que réalisée sur un seul site expérimental, cette étude permet de fournir des premières considérations de l'effet de l'agroforesterie sur la qualité des sols en Bretagne.

Les mesures de cette étude ont été faites de manière ponctuelle durant 3 semaines pendant lesquelles les conditions climatiques différaient d'un jour à l'autre ce qui a pu influencer certaines variables telles que la température, l'humidité ainsi que l'abondance des vers de terre. Au vu du nombre de répétition et de variables étudiées, certains protocoles ont été légèrement modifiés afin de faciliter et de réduire le temps des manipulations. Par exemple, lors de l'étude de l'abondance de vers de terre, de manière générale les auteurs utilisent du formol ou de la moutarde afin de les extraire (Cardinal et al 2019). Or dans notre étude les blocs de terre ont été prélevés sans utiliser le moindre produit. Concernant le protocole du pH, il a été réalisé grâce à une solution de KCl (acidité échangeable). Le pH KCl est toujours plus acide que le pH eau mais montre néanmoins une bonne stabilité et reflète mieux les échanges de la vie du sol. Cela implique que le pH réel est légèrement moins acide (**tableau 1**).

Afin de réduire certains biais, un échantillonnage aléatoire de l'ordre des prélèvements sur des deux parcelles a été réalisé. Néanmoins, à la moitié de la phase terrain, le calendrier de travail agricole de l'agriculteur a impliqué de finir les prélèvements de la parcelle AFIP en priorité, déséquilibrant un peu les conditions climatiques entre prélèvements en AFIP et en AFB sur la fin de la campagne. Cependant le nombre important de prélèvements permet de réduire autant que possible ce biais. De plus, le biais expérimentateur.rice.s a été minimisé en portant une attention particulière à ce que chacun.e des expérimentateur.rice.s travaille de manière similaire d'une journée à l'autre. Enfin les analyses statistiques ont été réalisées sur les valeurs absolues, obtenues pour chaque variable, pour aller plus loin et minimiser au plus le risque de biais climatiques ou expérimentateur.rice.s, il serait intéressant de travailler en relatif par rapport à un point contrôle, par exemple le point C.

Afin de compléter cette caractérisation de la qualité des sols agroforestiers, il aurait été nécessaire de réaliser des mesures complémentaires comme celle de la quantité de carbone organique dans le sol ou des mesures du fonctionnement biologique du sol. La mesure de la quantité de carbone du sol n'a pas pu être réalisée pour des raisons de durée de stage. En ce sens, il a été montré que l'arbre contribue à l'augmentation en profondeur de carbone par le turn-over racinaire (mortalité saisonnière des racines fines) (Maeght et al 2013, Pierret, et al. 2016). Celui-ci permet un stockage de carbone à long terme, qui améliore les propriétés physico-chimiques du sol profond, mais aussi la capacité de rétention. Il contribue ainsi significativement à la séquestration du carbone à long terme (Métral 2005). On peut donc supposer que la quantité de carbone soit supérieure aux pieds des arbres qu'en milieu de parcelle et ainsi expliquer les résultats de certaines des variables étudiées dans notre étude.

Enfin, les mesures de cette étude ne seront pas répétées car ce n'était pas l'objectif de cette étude qui est incluse dans un projet de thèse ayant d'autres objectifs, mais il serait intéressant d'observer l'effet des arbres sur la dynamique de la qualité du sol au sein d'une année (Cogliastro et al 2013) ou entre années (Chiffot, et al. 2009). La géolocalisation de la parcelle et le référencement précis de la position des arbres pourrait le permettre.

Malgré la spécificité de cette étude, les parcelles ont des conditions relativement similaires ce qui a permis d'étudier deux facteurs (type AF et position) en minimisant les risques que d'autres facteurs influencent les résultats. De plus, bien que certains facteurs soient à approfondir ou à ajouter, ce dispositif expérimental a permis d'intégrer un grand nombre de variables sur la qualité du sol ce qui n'est pas le cas pour un grand nombre d'études (Cardinael et al., 2020 ; Guillot et al., 2021).

Différences entre types d'agroforesterie

De nombreuses variables varient en fonction du type d'agroforesterie. Certains résultats semblent cohérents avec les résultats rapportés dans d'autres études. En effet, concernant l'humidité du sol, il a été prouvé que la haie a une influence plus grande sur la teneur en eau à son voisinage que d'autres types de couverts végétaux (Benhamou 2012) car l'assèchement des sols est plus lent bien que plus prononcée. Cette lenteur peut s'expliquer par l'ombrage que crée la haie (Carnet 1978). De plus, les parcelles étudiées ont toutes deux une exposition aux vents dominants d'Ouest, les points étudiés ont toujours été placés à l'Est des arbres. La haie ayant une densité d'arbre plus importante sur un même linéaire que les rangs en intra parcellaire, il est donc probable qu'elle ait un effet de protection contre le vent plus important (Sollen-Norrlin et al 2020) ce qui permettrait au sol de garder son l'humidité. La température moyenne est significativement supérieure en agroforesterie bocagère et pourrait être également expliquée

par l'effet de protection contre le vent (**Tableau 2**). Ces résultats pourraient cependant également être liés aux conditions climatiques présentes lors des mesures sur AFIP et AFB. En effet, la phase de terrain a été réalisée sur 3 semaines, et les prélèvements de la parcelle AFIP ont été réalisés principalement avant ceux de la parcelles AFB, le climat à cette période était plus froid et humide.

Dans notre étude, la haie possède en effet un pH significativement plus acide que la parcelle intra-parcellaire. Dans les études précédentes, la haie semble entraîner localement une modification des propriétés physiques et chimiques du sol (Dejong et Kowalchuk 1995, Caubel 2001). En climat tempéré, certains auteurs notent une acidité des sols plus marquée sous la haie que dans des prairies (Biffi, et al. 2022). Concernant l'azote minéral total, celui-ci est significativement différent entre les types d'agroforesterie. Le nitrate et l'ammonium ont été étudiés séparément afin d'expliquer plus en détail ce résultat. Il a été constaté que le NH_4^+ diffère selon le facteur type d'agroforesterie, et que le NO_3^- est significativement différent selon la position. Les mesures effectuées lors de cette étude ne nous donnent pas la possibilité d'expliquer les réelles raisons de ces différences. Néanmoins une hypothèse peut être émise concernant l'activité microbiologique du sol. L'activité microbienne dépend de deux facteurs abiotiques majeur : le pH et la température (Le Cadre, et al. 2009). Ainsi un fort pH serait lié à une minéralisation plus importante impliquant la respiration et donc l'acidification du sol, signe d'une production plus importante de NH_4^+ . D'autre part, selon le pouvoir tampon du sol cet NH_4^+ serait moins nitrifié, ce qui expliquerait une quantité inférieure de NO_3^- .

Enfin, la densité apparente du sol est plus élevée en agroforesterie AFIP qu'en agroforesterie AFB. Plusieurs études ont montré que la densité apparente était plus faible lorsque l'on se rapproche de l'arbre dû à la macroporosité des racines (Kumar et al 2010, S. Perret, et al. 1996). L'agroforesterie avec haies bocagère ayant une densité linéaire plus importante sur un même linéaire, il se pourrait que la densité racinaire soit également plus importante, donc une densité apparente plus faible sur AFB que sur la parcelle AFIP. Également, la haie a été plantée 2 ans avant la parcelle en AFIP, il est donc possible que le système racinaire soit plus développé en AFB, ce qui aurait un impact plus important sur la densité apparente.

Différence entre positions (A, B et C)

Trois variables varient en fonction de la position par rapport à l'arbre : la densité apparente, la biomasse et le pH. Pour ces trois variables, les valeurs obtenues aux points A diffèrent de celles obtenues en prairie (B et C présentant des valeurs similaires)

La densité apparente du sol est significativement inférieure au point A par rapport aux autres points. Inversement, la biomasse est significativement supérieure au point A. La densité

racinaire diminuant avec la distance aux arbres (S. Perret, et al. 1996, Alegre et Rao 1996), les racines de la végétation (végétations spontanée, arbres) pourraient donc avoir un effet de décompaction et ainsi diminuer la densité du sol. Certains auteurs ont montré que cette diminution de densité au près de l'arbre est entraînée par une augmentation de la macroporosité qui elle-même peut être liée à la présence de racines, à l'incorporation des produits d'élagage ou de litière, et à la présence d'invertébrés ingénieurs du sol (Follain, et al. 2007, Battie-Laclau 2020), ce qui soutient notre hypothèse. Le fait que le point B et C possèdent des densités significativement supérieures et des biomasses significativement inférieures peut être également lié à la mécanisation et aux animaux. En effet, le passage des engins agricoles et des animaux sur la parcelle peut engendrer des tassements et des compactions et ainsi augmenter la densité et en réduisant la porosité totale du sol (Arshad et al 1999, Pagliai, Vignozzi et Pellegrini 2004, Tannet et Mamaril 1959). Concernant les différences de biomasse, l'agriculteur n'a pas réalisé de fauche dernièrement sur le rang d'arbre, la végétation spontanée étaient donc haute, contrairement aux deux autres puisque les prélèvements ont été réalisés entre deux fauches.

Les arbres sur les parcelles sont relativement jeunes (entre 8 et 10 ans), ce qui peut expliquer la relative discrimination des propriétés du sol à la distance de l'arbre car il est possible que la qualité du sol soit influencée par la maturité des arbres (Cardinael, Chevallier, et al. 2017, Wotherspoon, et al. 2014, Pardon, et al. 2017). Deux questions se posent dans cette étude vis à vis des variables pH et abondance de vers de terre. Le pH étant une mesure liée à de nombre de processus liés aux cycles biogéochimiques, il est difficile d'interpréter les variations de cette variable par rapport aux facteurs type d'agroforesterie et position. L'interprétation de cette variable nécessite donc d'être complétée par l'estimation du pouvoir tampon du sol via les mesures de carbone organique et de capacité d'échange cationique du sol.

Une question se pose néanmoins concernant l'abondance de vers de terre qui n'est pas significativement différente en fonction de la position. Cela peut sembler surprenant car les lombriciens sont sensibles à la sécheresse (Van Rhee et Nathans 1973), et à la compaction du sol (Lowe et Butt 1999). Il aurait paru cohérent qu'il y ait une quantité de vers de terre inférieure au centre de la parcelle qu'au pied des arbres. Mais il a également été montré que l'abondance des vers de terre est supérieure en condition de prairie permanente qu'en culture annuelle, avec ou sans labour (Chan 2001). Notre étude se place dans un contexte de prairie temporaire, depuis 3 ans les parcelles n'ont pas subi de labour, il est possible que ces trois années sans perturbation aient permis aux vers de terre de se développer dans les prairies et ainsi augmenter leur abondance.

Le fait que la densité apparente soit plus faible au sein de la rangée d'arbre qu'aux autres points des parcelles et l'abondance de vers de terre étant homogène, nous pousse à émettre l'hypothèse que les racines ont une influence plus importante de décompaction que les vers de terre. Ainsi il serait pertinent de s'intéresser à la densité racinaire pour voir s'il y a un réel effet des racines sur la densité apparente du sol ou s'il s'agit plutôt de l'effet des pratiques agricoles.

Croisement des effets du type d'agroforesterie et de la position

L'azote du sol est également significativement supérieur dans la parcelle en agroforesterie en haie bocagère plutôt qu'en agroforesterie intra-parcellaire mais ne diffère pourtant selon la position. Cela peut paraître étonnant, en effet, (Mette et Sattelmacher 1994) ont montré que la teneur en azote au pied d'une haie bordant un champ cultivé était nettement plus importante que celle mesurée à 10 m, soit 9 t N. ha⁻¹ contre 5 t N. ha⁻¹ dans l'horizon 0-40 cm. Cette valeur est attribuée à l'effet de la litière de feuilles sous la haie qui apportent jusqu'à 69 kg N. ha⁻¹.

Le pH en position B de la parcelle en haie bocagère est bien plus acide que les autres points. Nous pouvons nous questionner alors sur la quantité de nitrification ou de lessivage qu'il peut y avoir en ce point. En effet, il est possible que pour le point A la nitrification soit compensée par la biomasse végétale qui intercepte l'azote, il y aurait donc un effet tampon. Or en position B, il y a bien moins de diversité végétale, cette effet tampon ne serait donc pas présent.

Conclusion et perspectives

L'objectif de cette étude était de caractériser la qualité physico-chimique selon le système agroforestier (haie bocagère et intra-parcellaire) et la distance à l'arbre.

Notre étude a montré que la qualité du sol dépendait majoritairement des différents types d'agroforesterie plutôt que du facteur position. Il a été intéressant de constater un réel effet des haies sur la densité apparente, l'humidité, la température, le pH, et l'azote minéral total comparé à l'intra-parcellaire. L'étude du facteur position a permis de se rendre compte de l'influence de la distance à l'arbre sur les variables de densité apparente, la biomasse ainsi que le pH : l'effet le plus marqué étant l'effet rang d'arbres versus prairie questionnant l'importance de l'impact des pratiques agricole sur les variables étudiées

La mise en relation des résultats sur les différentes variables étudiées nous ont permis de nous questionner sur le rôle de l'activité microbienne dans les effets constatés de l'agroforesterie sur la qualité des sols l'Ouest de la France.

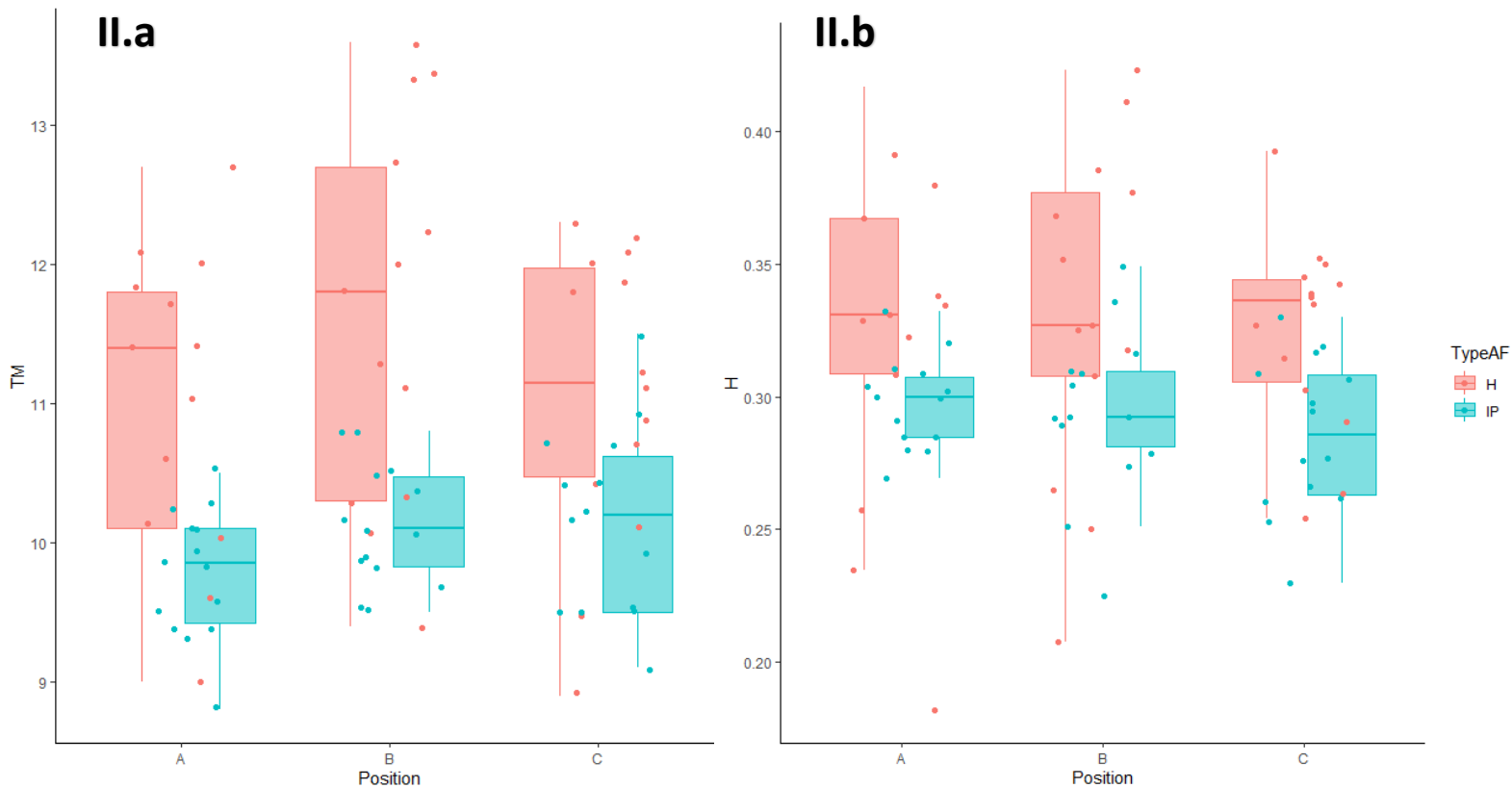
Pour répondre à ces questions des études complémentaires plus approfondie par l'intégration de nouvelles variables sur le sol seraient intéressantes à réaliser.

Annexe

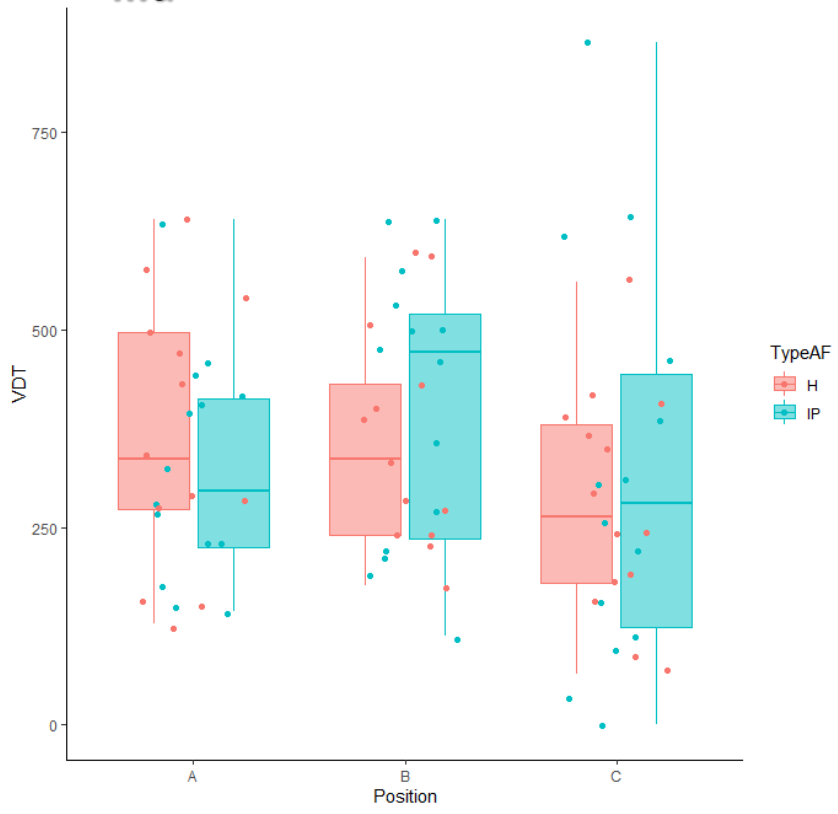
Annexe I : Méthodologie de mesures de la hauteur et de la circonférence des arbres :

La hauteur des arbres a été réalisée à l'aide d'un dendromètre trigonométrique (Dendromètre Talltax II) dont le fonctionnement est basé sur le théorème de Pythagore. Elle s'est faite de la base du tronc à la cime de l'arbre. La circonférence des arbres a été mesurée à hauteur de poitrine (~1,40 m) à l'aide d'un mètre ruban (DBH) (Strimbu 2021).

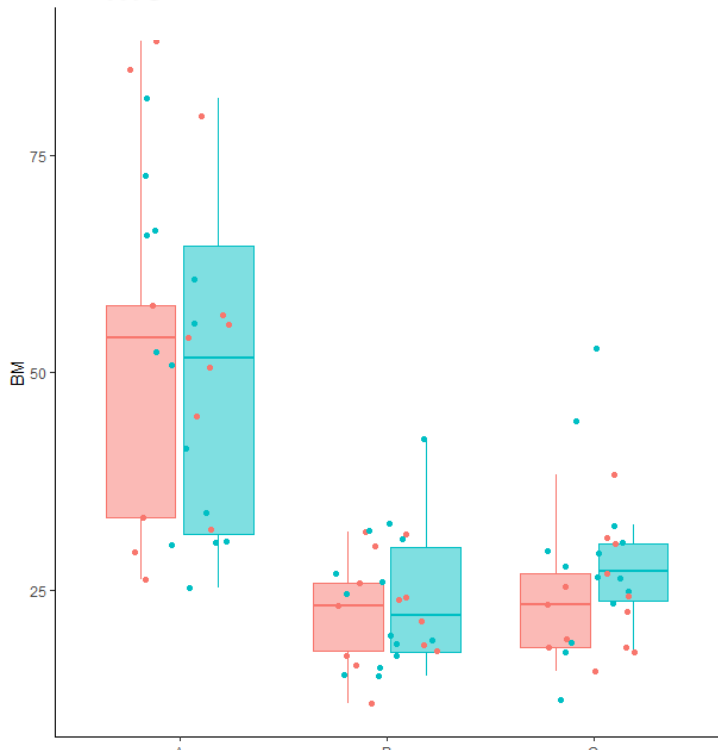
Annexe II : Barplots représentant les valeurs des différentes variables étudiées en fonction des facteurs type d'agroforesterie et position. Chaque barplot correspond à une variable : II.a) TM : Température moyenne ; II.b) H : % d'humidité ; II.c) BM : Biomasse ; II.d) VDT : Abondance de vers de terre ; II.e) DA : Densité apparente ; II.f) pH ; II.g) NminTot : Azote minéral total.



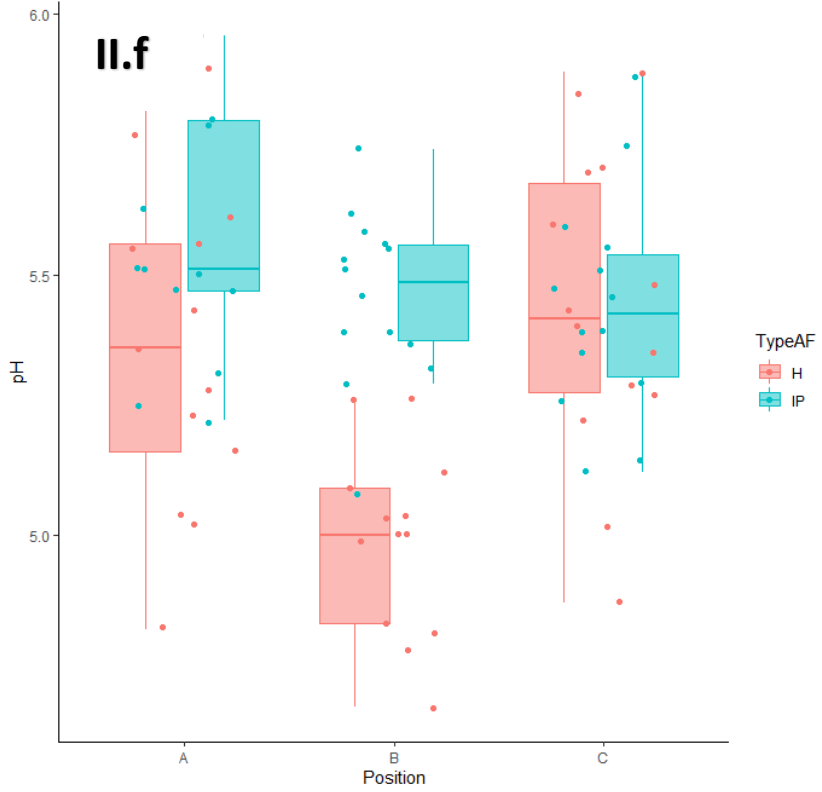
II.d



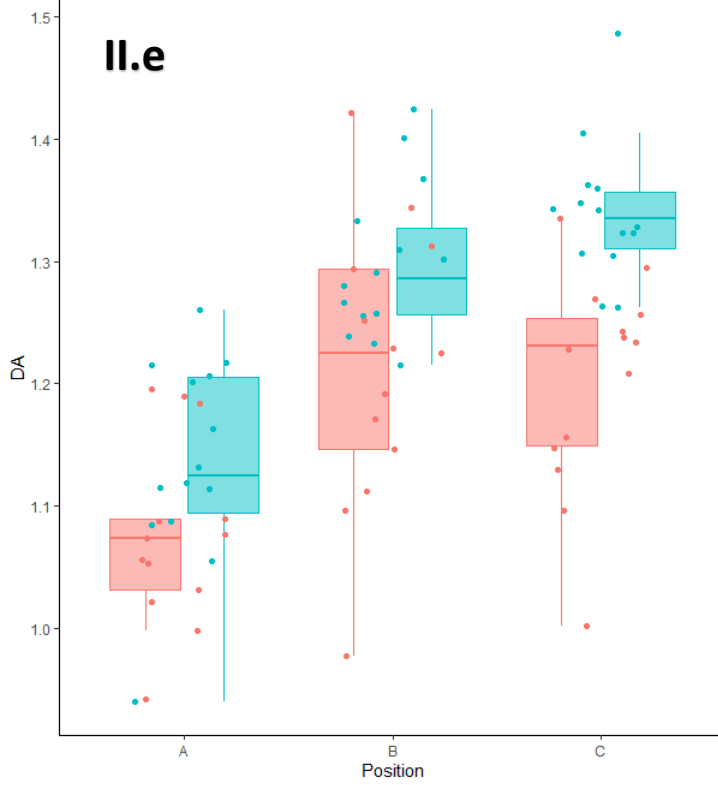
II.c

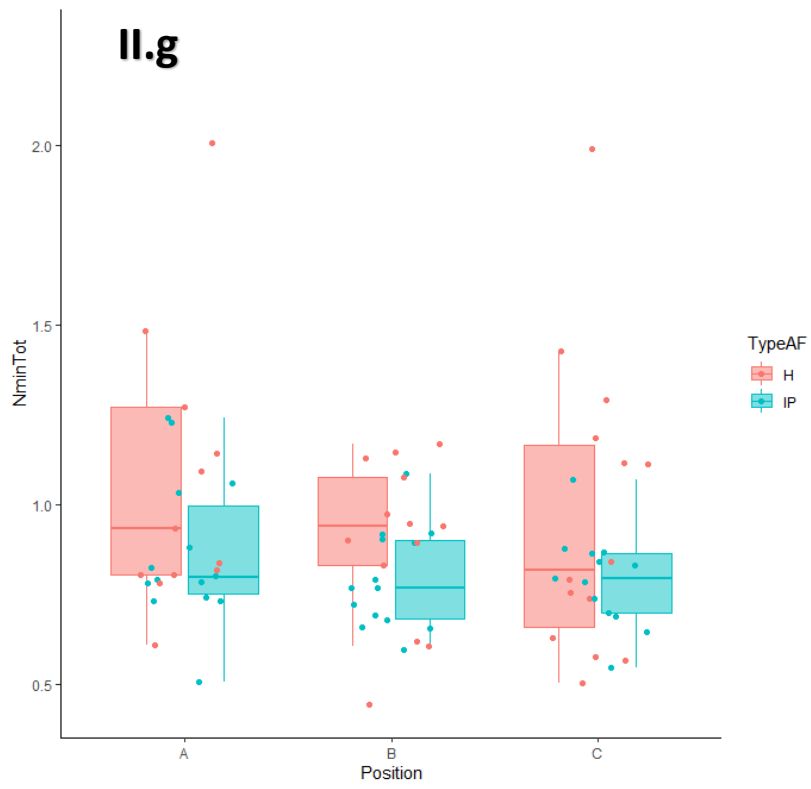


II.f



II.e





Bibliographie

- AFAC-Agroforesteries. *Référentie national sur la typologie des haies: modalités pour une gestion durable*. 2017.
- Alegre, J.C., et M.R Rao. «Soil and water conservation by contour hedging in the humid tropics of Peru.» *Agriculture Ecosystems & Environment*, 1996: 57.
- Altieri, M.-A., et C.J. Nicholls. «Agroecology: Challenges and opportunities for farming in the Anthropocene.» *Ciencia e investigación agraria: revista latinoamericana de ciencias de la agricultura* 47(3), 2020: 204-215.
- Arbousse-Bastide, T. «Economie «sauvage» et vente directe, déclin et résurgence des pratiques communautaires de l'agriculture en Bretagne.» *Pékéa*, 2006: 15p.
- Arshad, M.A., A.J. Franzluebbbers, et R.H. Azooz. «Components of surface soil structure under conventional and no-tillage in northwestern Canada.» *Soil and Tillage Research* 53 (1999): 41-47.
- Asfaux, Denis. «Agroforesterie : un mot récent pour des pratiques anciennes... ou pas.» *Nature Progrès*, 2016: 4.
- Bartlett, M.S. «Properties of sufficiency and statistical tests.» (Proceedings of the Royal Society of London Series A) 160 (1937): 268-282.
- Battie-Laclau, P. «Role of trees and herbaceous vegetation beneath trees in maintaining arbuscular mycorrhizal communities in temperate alley cropping systems.» *Plant and Soil*, 2020: 153-171.
- Benhamou, C. *Modélisation de l'effet des interactions haies-cultures sur le transferts d'eau et d'azote à l'échelle d'un petit bassin versant agricole*. Ph.D. Thèse , Rennes: Agrocampus Ouest, spécialité: Sciences de l'Environnement, 2012.
- Biffi, Sofia, Pippa J. Chapman, Richard P. Grayson, et Guy Ziv. «Soil carbon sequestration potential of planting hedgerows in agricultural landscapes.» (Journal of Environmental Management) 307 (2022).
- Bispo, A. «Le programme ADEME "Bioindicateurs de qualité des sols".» *Etude et Gestion des Sols*, 2009: 14.

- Boinot, S. «Distribution of overwintering invertebrates in temperate agroforestry systems: Implications for biodiversity conservation and biological control of crop pests.» *Agriculture, Ecosystems & environment*, 2019: 285.
- Caquet, Thierry, Chantal Gascuel, et Michèle Tixier-Boichard. *Agroécologie : des recherches pour la transition des filières et des territoires*. éditions Quae, 2020.
- Caquet, Thierry, et al. «Réflexion prospective interdisciplinaire pour l'agroécologie. Rapport de synthèse.» 2019: 108pp.
- Cardinael, R. «Impact of alley cropping agroforestry distribution of soil organic carbon A case study in a Mediterranean context.» *Geoderma*, 2015: 259-260.
- Cardinael, Rémi. «Belowground functioning of Agroforestry Systems:Recent Advances and Perspectives.» *Plant and Soil* 453, n°1, 2020: 1-13.
- Cardinael, Rémi, et al. «Increased soil organic carbon stocks under agroforestry: A survey of six different sites in France.» *Agriculture, Ecosystems & Environment* 236 (2017): 243-255.
- Cardinael, Rémi, et al. «Spatial Variation of earthworm communities and soil organic carbon in temperate agroforestry.» *Biology and Fertility of Soils*, Springer Verlag, 2019: 171-183.
- Carnet, C. «Etudes des sols et de leur régime hydrique en région granitique de Bretagne: une approche du rôle du bocage.» (U.E.R. Sciences Biologiques, mention Agronomie) 1978: 235p.
- Carpentier, Vincent. «Bocage et sociétés.» *Revue archéologique de l'Ouest*, n° 25, 2008: 282-88.
- Caubel, V. « Influence de la haie de ceinture de fond de vallée sur les transferts d'eau et de nitrate.» *Ph.D. thesis*. Rennes, France: INRAE, 2001.
- Chan, K.Y. «An overview of some tillage impacts on earthworm population abundance and diversity - implications for functioning in soils .» *Soil and Tillage Research*, 2001: 179-91.
- Chiffot, Vincent, David Rivest, Alain Olivier, Alain Cogliastro, et Damase Khasa. «Molecular analysis of arbuscular mycorrhizal community structure and spores distribution in tree-

- based intercropping and forest systems.» (*Agriculture, Ecosystems and Environment*) 131 (2009).
- Climate Data. *Climat Rennes: Pluviométrie et Température moyenne Rennes, diagramme ombrothermique pour Rennes*. 2022. <https://fr.climate-data.org/europe/france/bretagne/rennes-343/>.
- Cogliastro, Alain, Coline Kouchner, et Léa Bouttier. *Interactions entre les arbres et les cultures dans des systèmes de cultures intercalaires agroforestières dans un contexte de changements climatiques*. 2013. <https://www.agrireseau.net/agroclimatologie/documents/91558/interactions-entre-les-arbres-et-les-cultures-dans-des-systemes-de-cultures-intercalaires-agroforestieres-dans-un-contexte-de-changements-climatiques> (accès le Juin 2022).
- Dejong, E., et T.E. Kowalchuk. «The effect of shelterbelts on erosion and soil properties.» *Soil Science*, 1995: 159.
- Delassus, L. «Guide de terrain pour la réalisation des relevés phytosociologiques.» *Brest: Conservatoire botanique national de Brest*, 2015: 25p.
- Den Herder, Michael. «Current Extent and Stratification of agroforestry in the European Union.» *Agriculture, Ecosystems & Environment* 241, 2017: 121-32.
- D'Hervilly, C. «Sown understory vegetation strips impact soil chemical fertility, associated microorganisms and macro-invertebrates in two temperate alley cropping systems.» *Agroforestry Systems*, 2020: 1851-1864.
- Doran, J.W., et T.B Parkin. *Defining and assessing soil quality*. John Wiley&Sons, Ltd, 1994.
- Follain, S., C. Walter, A. Legout, B. Lemercier, et G. Dutin. «Induced effects of hedgerow networks on soil organic carbon storage within an agricultural landscape.» *Geoderma*, 2007: 80-95.
- Fox, J. «Applied Regression Analysis and Generalized Linear Models.» (Third Edition) Sage (2016).
- Fox, J., et S. Weisberg. «An R Companion to Regression.» *Third Edition*. SAGE publications, Thousand Oaks, 2019.

- Gliessman, Stephen R., Eric Engles, et Robin Krieger. *Agroecology: Ecological Processes in Sustainable Agriculture*. Lewis Publishers - CRC Press, 1998.
- Guillot, E. «Spatial heterogeneity of soil quality within a Mediterranean alley cropping agroforestry system: Comparison with a monocropping system.» *European Journal of Soil Biology*, 2021: 105.
- Guillot, Esther, et al. «Spatial heterogeneity of soil quality within a Mediterranean alley cropping agroforestry system: Comparison with a monocropping system.» *European Journal of Soil Biology*, 2021: 103330.
- Hollander, Myles, et Douglas A. Wolfe. «Non parametric Statistical Methods.» (John Wiley & Sons) 1973: 115-120.
- Husson, F., J. Josse, S. Le, et J. Mazet. *Package 'FactoMineR'*. 2020. <http://factominer.free.fr>.
- Kumar, Sandeep, Ranjith Udawatta, et Stephen H. Anderson. «Root length density and carbon content of agroforestry and grass buffers under grazed pasture systems in a Hapludalf.» *Agroforestry Systems*, 2010: 85-96.
- Labant, Pierre. *Le dispositif spatial agroforestier à la croisée des champs : une approche pluridisciplinaire du développement de l'agroforesterie en France*. Toulouse: Université Toulouse le Mirail, 2017.
- Le Cadre, Edith, F. Gerard, T. Morvan, et S. Recous. «Which Formalism to Model the pH and Temperature dependence of the Microbiological Process in Soils? .» *Emphasis of Nitrification. Environ Model Assess*, 2009: 539-44.
- Lemmon, P.E. «A nex instrument for measuring forest overstory density.» *Journal of Forestry*, 55, 1957: 667-668.
- Levang, P, et M Grouzis. «Méthodes d'études de la biomasse herbacée de formations sahéliennes: application à la Mare d'Oursi, Haute-Volta.» *Acta Ecologica, Ecologia Plantarum, Vol.1 (15), n°3*, 1980: 231-244.
- Lowe, C.N., et K.R. Butt. «Interspecific interactions between earthworms: a laboratory-based investigation.» *Pedobiologia*, 1999: 43: 808-817.
- MacFarland, Kate. «Alley Cropping: An Agroforestry Practice.» *Agroforestry #12*, 2017.

- Maeght, J.L., B. Rewald, et A. Pierret. «How to study deep roots - and why it matters.» *Frontiers Plant Science* 4, 2013.
- Mayard, D.G., et Y.P Karla. «Nitrate and Exchangeable Ammonium Nitrogen. In: Carter, M.R., Soil Sampling and Methods of Analysis.» *Lewis Publishers*, 1993.
- Meddour, Rachid. «La méthode phytosociologique sigmatiste ou Braun Blanqueto-Tüxenienne.» *Faculté des Sciences Biologiques et Agronomiques, Département des Sciences Agronomiques, Algérie*, 2011: 40.
- Métral, Raphaël. «BILANS AGRO-ENVIRONNEMENTAUX EN PARCELLES AGROFORESTIERES.» *Programme Agroforesterie 2006/08. n° 321. Agroforesterie recherche développement*, 2005.
- Mette, R., et B. Sattelmacher. «Root and nitrogen dynamics in the hedgerow - field interface. Consequences for land use management.» *In proceeding of the 7th Inter. Symp. of CIEC; Agroforestry and land use change in industrialized nations*, 1994: 275-84.
- Meynard, J.-M. «Freins et leviers à la diversification des cultures: études au niveau des exploitations agricoles et des filières.» *OCL*, 20(4), 2013: D403.
- Millennium Ecosystem Assessment . *Ecosystems and human well-being: wetlands and water synthesis: a report of the Millennium Ecosystem Assessment*. Washington, DC: World Resources Institute, 2005.
- Ministère de l'Agriculture, de l'Agroalimentaire et de la Forêt. «Plan de développement de l'agroforesterie _ Pour le développement et la gestion durable de tous les systèmes agroforestiers.» 2015.
- Nair, P.K.R. «Classification of Agroforestry Systems.» *Agroforestry Systems* 3, n°2, 1985: 97-128.
- Newman, C. Dupraz et S.M. «Temperate Agroforestry: The European Way.» *Temperate Agroforestry Systems*, 1997: 181-236.
- Office Français De La Biodiversité. *Haies et bocages: des réservoirs de biodiversité*. 2021. <https://www.ofb.gouv.fr/haies-et-bocages-des-reservoirs-de-biodiversite> (accès le 05 2022).

- Pagliai, M., N. Vignozzi, et S. Pellegrini. «Soil structure and the effect of management practices.» *Soil and Tillage Research, Soil Physical Quality* 79 (2004): 131-143.
- Pardon, P., et al. «Trees increase soil organic carbon and nutrient availability in temperate agroforestry systems.» *Agriculture, Ecosystems & Environment* 247 (2017): 98-111.
- Perret, S., R. Michellon, J. Boyer, et J. Tassin. «Soil rehabilitation and erosion control through agro-ecological practices on Reunion Island (French overseas territory, Indian ocean).» *Agriculture Ecosystems & Environment*, 1996: 59.
- Perret, Sylvain, Roger Michellon, Johnny Boyer, et Jacques Tassin. «Soil rehabilitation and erosion control through agro-ecological practices on Reunion Island (French Overseas Territory, Indian Ocean).» *Agriculture, Ecosystems & Environment* 59 (1996): 149-157.
- Pierret, A., J.L. Maeght, C. Clement, J.P. Montoroi, C. Hartmann, et S. Gonkhamdee. «Understanding deep roots and their functions in ecosystems: an advocacy for more unconventional research.» *Annals of Botany* 118 (2016): 621-635.
- Pointereau , Philippe, et Frédéric Coulon. *La haie en France et en Europe: Evolution ou régression, au travers des politiques agricoles*. Première rencontres nationales de la haie champêtre, 2006.
- Royston, Patrick. «Algorithm AS 181: The WW test for Normality.» (*Applied Statistics*) 31 (1982): 176-180.
- Sanchez , I.A., et D. Mc Collin. «A comparison of microclimate and environmental modification produced by hedgerows and dehesa in the Mediterranean region: A study in the Guadarrama region, Spain.» *Landscape and Urban Planning*, 2015: 230-237.
- Sinclar, Fergus L. «A General Classification of Agroforestry Practice.» *Agroforestry Systems* 46, n°2, 1999: 161-80.
- Sollen-Norrin, Maya, Bhim Bahadur Ghaley, et Naomi Laura Jane Rintoul. «Agroforestry Benefits and Challenges for Adoption in Europe and Beyond.» *Sustainability*, 2020.
- Strimbu, Bogdan. *Dendrometry Field Manual*. Louisiana, 2021.
- Tannet, C.B., et C.P. Mamaril. «Pasture Soil Compaction by Animal Traffic.» 1959: 329-31.
- Thenail, Claudine, Stephanie Aviron, Valérie Viaud, Thierry Guehenneuc, et Cyrille Menguy. «Vers une agroforesterie bocagère en Bretagne. Rénover le bocage en renouvelant les

- points de vue et les pratiques [Rapport de recherche].» *INRAE; Association Terres & Bocages*, 2017: 5.
- Toullec, Jean-Luc. «Les politiques publiques du bocage en Bretagne.» *Sciences Eaux & Territoires* Numéro 30, n° 4 (2019): 84-87.
- Van Rhee, J.A., et S. Nathans. «Ecological aspects of earthworm populations in relation to weather conditions.» *Rev. Ecol. Biol. Soil*, 1973: 10, 4 : 523-533.
- Wotherspoon, A., N.V. Thevathasan, A.M. Gordon, et R.P. Voroney. «Carbon sequestration potential of five tree species in a 25-year-old temperate tree-based intercropping system in southern Ontario, Canada.» *Agrofor. Syst.* 88 (2014): 631-643.
- Yoro, Gballou, et Gnaboua Godo. «Les méthodes de mesure de la densité apparente: analyse de la dispersion des résultats dans un horizon donné.» *Cah. ORSTOM, dl-. Pédol., vol. XXV, n°4*, 1990: 423-429.
- Zhang, Ping. *Nutrient inputs from trees via throughfall, stemflow and litterfall in an intercropping system*. University of Guelph, 1999.

Résumé

L'agroforesterie est considérée comme un levier pour la transition agroécologique. Nous nous intéressons plus particulièrement à l'agroforesterie bocagère - rangée d'arbres en bord de la parcelle - et intra-parcellaire - rangées d'arbres au sein de la parcelle -. Notre étude s'intéresse à la qualité des sols dans les systèmes agroforestiers bretons cultivée en prairie temporaire selon deux facteurs : le type d'agroforesterie et la position. La qualité du sol a été mesurée par un set de variables dans deux parcelles agroforestières (une avec haie bocagère, l'autre en intraparcellaire) d'une dizaine d'année et à trois distances de l'arbre (dans la rangée – 0,5 m-, en bordure de l'allée cultivée – 1,5 m, dans la parcelle – 10 m). Les variables étudiées sont : le pH ; la densité apparente ; l'abondance de vers de terre ; le recouvrement du sol ; l'azote minéral totale ; la biomasse ; l'humidité et la température moyenne. Les résultats ont montré qu'un plus grand nombre de variables différent selon le facteur type d'agroforesterie par rapport au facteur position. Seule l'abondance des vers de terre n'est pas significativement influencée par l'un ou l'autre des facteurs. La mise en relation des variables questionne sur le rôle de l'activité microbienne pour expliquer la qualité du sol en système agroforestier.