

VetAgro Sup

Mémoire de fin d'études d'ingénieur

Étude de l'activité biologique de
dégradation de la matière organique du
sol en verger et verger-maraîcher

Juliette Peugeot
Concevoir et Accompagner l'Innovac'tion en agronomie
2020-2021



l'institut Agro
agriculture • alimentation • environnement



VetAgro Sup

VetAgro Sup

Mémoire de fin d'études d'ingénieur

Étude de l'activité biologique de dégradation de la matière organique du sol en verger et verger-maraîcher

Juliette Peugeot
Concevoir et Accompagner l'Innovac'tion en agronomie
2020-2021

Maîtres de stage :
Patrice Cannavo (AgroCampus Ouest – Angers)
et Pascale Guillermin (AgroCampus Ouest – Angers, IRHS)
Enseignante référente : Gaëlle Marliac



l'institut Agro
agriculture • alimentation • environnement



VetAgro Sup

« L'étudiant conserve la qualité d'auteur ou d'inventeur au regard des dispositions du code de la propriété intellectuelle pour le contenu de son mémoire et assume l'intégralité de sa responsabilité civile, administrative et/ou pénale en cas de plagiat ou de toute autre faute administrative, civile ou pénale. Il ne saurait, en cas, seul ou avec des tiers, appeler en garantie VetAgro Sup. »

Remerciements

Je remercie le GisFruit, l'Institut Agro – Agro CampusOuest – Angers ainsi que l'IRHS d'avoir permis la réalisation de ce stage en le finançant, et en m'accueillant sur les sites d'enseignement et de recherche d'Angers et de Beaucouzé.

Je remercie Gaëlle Marliac d'avoir été ma référente pour ce stage et d'avoir répondu à mes questions.

Je tiens à remercier également Patrice Cannavo et Pascale Guillermin de m'avoir encadrée et accompagnée tout au long de ce travail et en particulier pour le traitement de mes données et leur analyse ainsi que pour la relecture de ce rapport.

Merci à Toky Ramananjatovo pour son aide et son accompagnement également, pour m'avoir expliqué le principe d'une partie de mes mesures et pour m'avoir aidé à les mettre en place ; ainsi que pour l'atmosphère agréable de travail au bureau.

Merci à René Guénon pour ses apports de connaissances sur la microbiologie des sols et sur les mesures que j'ai réalisées et d'avoir pris le temps de répondre à mes questions.

Merci à Nova Guion pour son aide précieuse et son enthousiasme, sans qui une grosse partie des mesures n'aurait probablement pas pu être réalisée.

Je remercie aussi Tom, Mélanie et Jeanne pour les explications et l'aide sur les C-flux, le dosage CN et la microResp.

Merci à Yvette Barraud-Roussel d'avoir réalisé les mesures de carbone et d'azote et je remercie Dominique Lemesle, Céline Levron et Lydia Brialix pour leur aide au laboratoire.

J'adresse mes remerciements également à Frédérique Didelot, Christophe Brouard et toute l'équipe de l'INRAE de Beaucouzé pour la coordination des mesures au verger.

Je remercie également toute l'équipe d'enseignants-chercheurs de l'unité EPHor pour l'accueil et l'atmosphère de travail agréable.

Et enfin pour tous les moments joyeux passés ensemble avant, pendant et après le travail ainsi que pour le soutien moral dans les moments de fatigue, je remercie de tout cœur les stagiaires et doctorant.e.s présent.e.s durant ma période de stage. Merci à Mélanie, Loli, Tom, Amira, Souleymane, Toky, Soline, Emma, Claire, Eva, Jeanne, Nova et en particulier merci à Julien pour ses encouragements et son soutien sans faille durant la rédaction de ce mémoire.

Sommaire

Table des matières

Remerciements.....	7
Sommaire.....	9
1 Introduction.....	1
2 État de l'art.....	2
2.1 Les matières organiques, support de l'activité biologique du sol.....	2
2.1.1 Les Matières organiques du sol.....	2
2.2 Activité biologique du sol.....	2
2.2.1 Acteurs de l'activité biologique du sol.....	2
2.2.2 Respiration du sol.....	4
2.2.3 Minéralisation de l'azote.....	5
2.3 Systèmes agroforestiers : influence des arbres sur l'activité biologique du sol.....	6
2.3.1 Apport de matière organique, de nutriments et d'eau au sol.....	6
2.3.2 Activité biologique dans la rhizosphère.....	7
2.3.3 Modification du micro-climat du sol en verger-maraîcher.....	9
2.3.4 Répartition spatiale et prélèvement des nutriments dans le sol en verger-maraîcher.....	9
2.4 Pratiques agricoles en verger-maraîcher et influence sur l'activité biologique du sol.....	10
3 Questionnements scientifiques, problématique et hypothèses.....	11
4 Matériels et Méthodes.....	12
4.1 Présentation des sites d'étude.....	12
4.2 Description du type de sol.....	12
4.3 Plan d'échantillonnage.....	13
4.4 Dynamique de dégradation de la matière organique.....	14
4.4.1 Ressources disponibles pour l'activité biologique du sol : mesure des teneurs en carbone et azote total.....	14
4.4.2 Respiration basale (Bas) et induite (SIR) du sol en conditions contrôlées : MicroResp ©.....	14
4.4.3 Respiration du sol <i>in situ</i> : mesure des flux de CO ₂	15
4.5 Cycle de l'azote dans le sol : mesure de minéralisation de l'azote <i>in situ</i>	15
4.6 Fragmentation de la litière.....	16
4.6.1 Tea Bag Index.....	16
4.7 Traitement des données et analyse statistique.....	16
5 Résultats et interprétation.....	18
5.1 Dynamique de dégradation de la matière organique.....	18
5.1.1 Ressources disponibles pour l'activité biologique du sol : mesure des teneurs en carbone et azote total.....	18
5.2 Respiration basale (Bas) et induite (SIR) du sol en conditions contrôlées : MicroResp ©.....	19
5.2.1 Parcelle Verger-Maraîcher.....	19
5.2.2 Parcelle INRAE.....	20
5.3 Respiration du sol <i>in situ</i> : mesure des flux de CO ₂	21
5.3.1 Comparaison des flux moyens journaliers.....	21
5.3.2 Analyse en composante principale (ACP) sur les données des deux parcelles.....	22
5.3.3 ACP sur les données de l'INRAE seules.....	26
5.4 Lien entre les variables mesurées.....	27
5.4.1 Lien entre les flux de respiration <i>in situ</i> et la température.....	27
5.4.2 Lien entre teneur en matière organique et respiration du sol.....	28
5.4.3 Lien entre respiration en conditions contrôlées et en conditions réelles.....	29
5.5 Cycle de l'azote dans le sol : mesure de minéralisation de l'azote <i>in situ</i>	30

5.5.1	Parcelle Verger-Maraîcher.....	30
5.5.2	Parcelle Inrae.....	31
6	Discussion.....	32
6.1	Effet des arbres sur les teneurs en C et N organiques du sol.....	32
6.2	Biodégradabilité du carbone organique du sol.....	32
6.3	Minéralisation de l'azote organique du sol.....	33
6.4	Gestion de la couverture du sol et des intrants.....	34
7	Conclusion.....	35

Index des illustrations

Figure 1: Cycle du carbone (en rouge) et de l'azote (en bleu). Modifié d'après Chambre d'agriculture Occitanie 2011 ; Duparque 2017 ; Ramananjatovo 2019.....	4
Figure 2: Schéma des flux de respiration du sol, des plantes et de l'écosystème (Delogu 2013). Réco : Respiration écosystème, Raa : Respiration autotrophe des parties aériennes, Rar : respiration autotrophe des racines, Rh : respiration hétérotrophe, Rs : respiration du sol, GPP : Production primaire brute.....	6
Figure 3: Déroulement de la minéralisation brute de l'azote dans le sol. (L'agro Reporter 2013).....	6
Figure 4: Localisation des parcelles d'étude sur le site de l'INRAE de Beaucouzé et de l'Institut Agro - Angers. Modifié d'après Géoportail 2020.....	12
Figure 5: Plan d'échantillonnage de la parcelle verger-maraîcher.....	14
Figure 6: Plan du verger INRAE et dispositif expérimental du stage. Les lignes de cercles verts représentent les rangs d'arbres (R), l'espace entre chaque rang d'arbres correspond à l'inter-rang (IR). Les répétitions de la modalité azotée sont colorées en orangé et les répétitions de la modalité carencée sont en blanc. Les modalités en gris n'ont pas été étudiées dans ce travail.....	14
Figure 7: Kit MicroResp. La gélose colorée se situe dans la plaque du haut, scellée à l'aide d'un joint à la plaque des micro-puits contenant les échantillons de sol et le substrat.....	16
Figure 8: Analyseur C-flux en cours de mesure. La chambre de mesure (partie ronde) est abaissée.....	16
Figure 9: Tube de mesure de la vitesse de minéralisation de l'azote in situ.....	16
Figure 10: Frise récapitulative du déroulement des mesures durant le stage. Les mesures de C-flux au VM (cercles clairs) ont été effectués les 26/04, 03/05, 28/05, 30/06 et 15/07. Les mesures de C-flux au verger INRAE (cercles foncés) ont été effectués les 07/05, 10/05, 11/06 et 21/06.....	18
Figure 11: Teneur en carbone total dans les modalités du VM et du verger INRAE. Les tests statistiques ont été réalisés séparément pour les deux parcelles.....	20
Figure 12: Teneur en azote total dans les modalités du VM et du verger INRAE. Les tests statistiques ont été réalisés séparément pour les deux parcelles.....	20
Figure 13: Carbone émis par respiration basale dans le verger-maraîcher (n=48).....	20
Figure 14: Carbone émis par respiration induite dans le verger-maraîcher (n=48).....	20
Figure 15: Carbone émis par respiration basale dans le verger INRAE (n=48).....	22
Figure 16: Carbone émis par respiration induite dans le verger INRAE (n=48).....	22
Figure 17: Evolution du flux de CO ₂ sur la bande témoin (C) du VM le 26 avril (bleu) et sur le rang de pommiers carencé en azote (SansN_R) du verger INRAE le 7 mai 2021 (orange).....	21
Figure 18: Comparaison des flux moyens journaliers entre les modalités du VM (n _{bandes} = 4, n _{rangs} = 1).....	21
Figure 19: Comparaison des flux moyens journaliers entre les modalités du verger INRAE (n=2).....	22
Figure 20: Contributions des variables pour l'ACP. Données INRAE et verger-maraîcher confondues.....	23
Figure 21: Position des échantillons les uns par rapport aux autres selon les dimensions 1 et 2 de l'ACP.....	24
Figure 22: Courbes de flux de CO ₂ de 6 échantillons. Les numéros correspondent respectivement aux échantillons suivants : 1 : B1W le 26-04 ; 5 : B2W le 26-04 ; 9 : planche C le 26-04 ; 26 : N_IR le 25-06 ; 27 : Sans N_R le 07-05 ; 28 : N_R le 10-05.....	24

Figure 23: Étude du facteur parcelle selon les dimensions 1 et 2 de l'ACP.....	26
Figure 24: Étude du facteur position dans le verger selon les dimensions 1 et 2 de l'ACP.....	26
Figure 25: Contribution des variables pour l'analyse des flux du verger INRAE.....	26
Figure 26: Étude du facteur position dans le verger selon les dimensions 1 et 2 de l'ACP en séparant les degrés d'éloignement aux arbres et en distinguant l'inter-rang du verger INRAE des bandes maraîchères du verger-maraîcher.....	28
Figure 27: Caractérisation des flux pour les modalités d'apport d'azote sur le verger INRAE.....	28
Figure 28: Evolution du flux de CO2 et de la température du sol sur la bande maraîchère témoin (C) du verger-maraîcher le 26 avril 2021.....	27
Figure 29: Evolution du flux de CO2 et de la température du sol sous le rang de pommiers Est (E) du verger-maraîcher le 15 juillet 2021.....	28
Figure 30: Evolution du flux de CO2 et de la température du sol sous le rang de pommiers de la modalité carencée en azote (SansN_R) du verger INRAE le 7 mai 2021.....	28
Figure 31: Lien entre la teneur en carbone total du sol et la respiration basale en conditions contrôlées (n=3).....	28
Figure 32: Lien entre la teneur en carbone total du sol et la respiration induite en conditions contrôlées (n=3).....	30
Figure 33: Lien entre la teneur moyenn en carbone total du sol et le flux moyen journalier de respiration in situ. (n _C = 3, n _{Flux INRAE} = 2, n _{Flux VM bandes} =4, n _{Flux VM rang} =1).....	30
Figure 34: Lien entre le flux moyen journalier de respiration in situ et la quantité moyenne de carbone émis en respiration basale (Respectivement n _{flux INRAE} =2, n _{VM bandes} = 4, n _{VMrang} = 1, n _{BAS} = 48).....	30
Figure 35: Lien entre le flux moyen journalier de respiration in situ et la quantité moyenne de carbone émis en respiration induite (Respectivement n _{flux INRAE} =2, n _{VM bandes} = 4, n _{VMrang} = 1, n _{SIR} = 48).....	30
Figure 36: Vitesse de minéralisation de l'azote sur les différentes planches maraîchères pour la période du 5 mai au 7 juin 2021 (33 jours, n = 3).....	32
Figure 37: Vitesse de minéralisation de l'azote sur les différentes planches maraîchères pour la période du 8 juin au 27 juillet 2021 (49 jours, n=3).....	32
Figure 38: Vitesse de minéralisation de l'azote selon la position dans le verger INRAE pour la période du 21 mai au 21 juin 2021 (31 jours, n=4).....	32
Figure 39: Vitesse de minéralisation de l'azote selon la position dans le verger INRAE pour la période du 1er juillet au 27 juillet 2021 (26 jours, n = 4).....	32

Index des tableaux

Tableau 1: Caractéristique du sol des parcelles Verger-maraîcher et INRAE.....	13
Tableau 2: Nomenclature utilisée pour les modalités analysées.....	17
Tableau 3: Tableau récapitulatif des mesures effectuées.....	18
Tableau 4: Ratios de respiration induite/respiration basale (SIR/Bas).....	19
Tableau 5: Ratios SIR/Bas.....	20
Tableau 6: Variables de flux utilisées pour réaliser l'analyse en composantes principales (ACP).....	22

1 Introduction

Les systèmes et pratiques agricoles sont amenés à évoluer pour limiter leurs dépendances aux énergies fossiles et leurs impacts négatifs directs sur l'environnement (eutrophisation de l'eau, érosion de la biodiversité par exemple). L'un des axes de travail majeurs est de diminuer l'utilisation de fertilisants minéraux et de produits phytosanitaires de synthèse. Les cycles de la matière organique et des éléments minéraux contenus dans les sols sont des processus essentiels pour la production agricole puisqu'ils sont les supports de la nutrition des cultures et plus largement, de la durabilité des sols (Bachelier 1963 ; Grayston et al. 1997 ; Chambre d'agriculture Occitanie 2011 ; Duparque 2017). Ils sont influencés par les conditions pédo-climatiques et les types d'écosystèmes considérés et ne se déroulent donc pas de la même façon selon les contextes pédoclimatique et agronomique. Il est donc nécessaire de comprendre ces mécanismes naturellement réalisés dans les écosystèmes afin de gérer au mieux la nutrition des cultures, en réduisant notamment les intrants de synthèse.

Les associations d'espèces végétales apparaissent comme une réponse possible aux enjeux environnementaux car elles permettent une meilleure résilience des systèmes agricoles face aux stress biotiques et abiotiques, et ce grâce à l'augmentation de la diversité d'espèces végétales et animales présentes dans les parcelles. Parmi la diversité d'associations possibles, l'agroforesterie, qui consiste à associer sur une même surface des arbres et des cultures présente de nombreux atouts (Nair 1993 ; Torquebiau 2000). Ces systèmes qui étaient courants en Europe avant le remembrement et que l'on retrouve encore fréquemment en zones tropicales, suscitent un regain d'intérêt de la part de la communauté scientifique et des décideurs publics, dans un contexte de changement climatique, de pression sur les surfaces agricoles et de la nécessité d'une agriculture plus vertueuse vis-à-vis de l'environnement. Ce sont cependant des systèmes divers et complexes, encore minoritaires dans le paysage agricole en climat tempéré, ce qui soulève de nombreuses questions quant aux mécanismes qui s'y déroulent et aux pratiques à mettre en place pour les gérer (Nair 1993 ; Torquebiau 2000 ; Pardon et al. 2017 ; Paut 2020). La compréhension des cycles biogéochimiques internes à ces systèmes est donc l'un des éléments nécessaires à leur mise en place et leur gestion.

Les vergers-maraîchers (VM) sont un type particulier de système agroforestier qui consistent à associer sur une même parcelle des arbres fruitiers et des cultures légumières (Paut 2020). Ils semblent pouvoir répondre à certains enjeux actuels pour l'agriculture, grâce à leur meilleure efficacité d'utilisation des terres qui peut être un avantage face à une forte compétition avec l'urbanisation, les productions diversifiées répondent aux besoins en produits frais et leur dimension agro-écologique semble pouvoir limiter les externalités négatives liées à l'agriculture (Paut 2020).

L'Institut Agro – Agrocampus Ouest- Angers est un établissement d'enseignement supérieur et de recherche spécialisé en horticulture et paysage. Sur le site de l'établissement, une parcelle est conduite en système agroforestier depuis 2017. Cette parcelle était à l'origine un verger implanté en 2000. Après plus de dix ans, les arbres ont commencé à s'affaiblir et la question s'est posée de l'avenir de la parcelle. A l'initiative d'un groupe d'étudiants, il a été décidé de transformer le verger en verger-maraîcher afin de tester un mode de culture agroécologique.

Les premiers essais d'implantation de couverts végétaux et de cultures légumières ont montré de la variabilité au sein de la parcelle (rendements, propriétés bio-physico-chimiques des sols, microclimat). Il y a donc un intérêt à comprendre cette variabilité en lien avec la présence des arbres. Par ailleurs, la compréhension des cycles de la matière organique et des nutriments est davantage complexe dans ces systèmes. Un travail de thèse est donc en cours, afin de « caractériser, hiérarchiser et modéliser les principaux mécanismes régissant les cycles du carbone (C), de l'azote

(N) et de l'eau dans le système VM, en relation avec l'espace (proximité des arbres) et le temps (rotation maraîchère) » (Ramananjatovo 2019).

Mon stage s'inscrit dans le cadre de cette thèse afin de caractériser l'activité biologique de dégradation de la matière organique du sol et en particulier de transformation du carbone et de l'azote dans des systèmes de verger, avec ou sans association légumière.

2 État de l'art

2.1 Les matières organiques, support de l'activité biologique du sol

2.1.1 Les Matières organiques du sol

Les matières organiques du sol (MOS) se définissent comme l'ensemble des constituants morts ou vivants, présents dans le sol et à sa surface, issus des espèces animales végétales ou microbiennes (Chambre d'agriculture Occitanie 2011). On distingue trois groupes de matières organiques : les matières organiques vivantes (espèces vivantes animales, végétales, microbiennes, fongiques en activité), les matières organiques facilement décomposables (débris et résidus issus des espèces en activités ou mortes et composés organiques intermédiaires issus de l'activité microbienne de décomposition et de transformation) et les composés organiques stabilisés (MO stable). Ils comprennent les matières humiques, ou humus qui proviennent de l'évolution des deux autres types de MO vers des molécules plus stables. Difficilement dégradables, elles sont aussi qualifiées de récalcitrantes. C'est la part la plus importante des MO du sol car elle représente entre 70 % et 90 % du total (Chambre d'agriculture Occitanie 2011 ; Marsden 2014).

Dans le sol, l'humus et l'argile s'associent pour former le complexe argilo-humique (CAH). Ces deux types de molécules s'associent par l'intermédiaire de cations polyvalents présents dans le sol comme le Ca^{2+} , Fe^{2+} et Fe^{3+} . Cette association forme un colloïde chargé négativement sur sa surface et stable car l'humus est protégé de la minéralisation par l'argile et l'humus empêche la dispersion de l'argile en retenant l'eau. Par ailleurs, la charge négative du CAH permet de fixer des cations à sa surface par adsorption. Le CAH constitue ainsi une réserve nutritive pour les organismes vivants du sol (Chambre d'agriculture Occitanie 2011 ; Duparque 2017).

La matière organique du sol est indispensable à la fertilité chimique, physique et biologique du sol, c'est-à-dire sa capacité à soutenir la croissance végétale en apportant les éléments et les conditions essentiels à celle-ci : structure, porosité, teneur en nutriments, fonctionnement des cycles biologiques (Berner et al. 2013 ; Delahaie et al. 2016). En effet, elle assure le stockage et la mise à disposition des éléments minéraux pour les plantes et peut retenir des molécules polluantes comme des hydrocarbures ou des éléments traces métalliques. Elle maintient la structure, la porosité et la capacité de rétention d'eau du sol grâce au CAH qui forme des agrégats, le protégeant ainsi de l'érosion et des tassements et favorise le réchauffement du sol. Enfin, elle stimule l'activité biologique du sol en étant à la fois source d'énergie et de nutriments pour les organismes vivants (Grayston et al. 1997 ; Fontaine et al. 2003 ; Chambre d'agriculture Occitanie 2011 ; Liagre et al. 2017).

2.2 Activité biologique du sol

2.2.1 Acteurs de l'activité biologique du sol

L'activité biologique du sol désigne l'ensemble des processus métaboliques effectués par les êtres vivants du sol (Bachelier 1963). Ces processus utilisent et transforment la matière et l'énergie présentes dans et à la surface du sol. Ces processus sont nécessaires à l'équilibre pédologique

puisqu'ils maintiennent les propriétés physico-chimiques du sol. Les principaux êtres vivants impliqués dans l'activité biologique du sol sont (Bachelier 1963) :

- La faune méso et macro : invertébrés et petits animaux qui fragmentent les débris végétaux. Ceux-ci peuvent modifier grandement la morphologie des profils pédologiques en influant sur la porosité, le pouvoir de rétention d'eau et la nature des éléments chimiques libres ou adsorbés.
- Les micro-organismes : champignons, bactéries, algues, nématodes qui minéralisent la matière organique. Cela passe par de nombreuses propriétés physiques, biologiques et chimiques et processus comme l'accroissement du potentiel enzymatique du sol, la participation à tout ou partie des cycles biologiques de nombreux éléments minéraux, la synthèse et la dégradation des substances humiques et des complexes organométalliques. Ils influencent le pH et le potentiel Redox du sol et agissent sur la genèse et la dégradation de sa structure.

Dans la littérature, les travaux qui mentionnent l'activité biologique du sol étudient en particulier les organismes et processus suivants :

- La biomasse, l'abondance et la diversité de la mésofaune et macrofaune (en général les vers de terre sont choisis comme proxy) (Jamar et al. 2009 ; Siebert et al. 2019 ; Sadeghi, Taban 2021)
- La biomasse microbienne (Wołejko et al. 2020)
- La respiration microbienne (Jamar et al. 2009 ; Siebert et al. 2019)
- La dégradation de la matière organique (Siebert et al. 2019)
- Les cycles des minéraux (Siebert et al. 2019)
- L'activité enzymatique du sol (Wołejko et al. 2020). Selon les études, il s'agit d'une ou plusieurs enzymes particulières, responsables d'une ou plusieurs étapes des cycles biogéochimiques (Wołejko et al. 2020 ; Sadeghi, Taban 2021).
- Les interactions entre organismes du sol, comme la suppression des pathogènes via des mécanismes de prédation ou de parasitisme (Altieri 1999).

Cette activité biologique est donc nécessaire au cycle de la matière organique et des nutriments dans les agroécosystèmes. La figure 1 montre le cycle de la matière organique et celui de l'azote dans le système sol-plante-atmosphère. Les végétaux captent le CO₂ dans l'air par la photosynthèse pour produire leur propre biomasse et leur énergie. Ils en relâchent également par la respiration. Par la litière, les résidus de culture, le turnover racinaire (croissance, développement et sénescence des racines) et les exsudats racinaires, des composés organiques sont incorporés dans le sol, sous l'action des organismes du sol. La litière est transformée par humification en des molécules stables ou décomposées en des molécules de plus en plus petites qui sont ensuite minéralisées par les micro-organismes du sol. Cette minéralisation a pour effet de mettre à disposition des nutriments pour les plantes et les organismes du sol qui utilisent le carbone et les éléments minéraux pour leur propre énergie et pour constituer leur biomasse. Ces minéraux peuvent aussi être captés par le CAH. Ils sont alors immobilisés dans les organismes vivants ou les colloïdes du sol, on parle d'immobilisation ou d'organisation de la MO. L'activité microbienne du sol s'accompagne de respiration, donc d'une émission de CO₂ vers l'atmosphère. En ce qui concerne le cas particulier de l'azote, les formes disponibles pour les plantes (NO₃⁻ et NH₄⁺) peuvent provenir à la fois de la matière organique minéralisée, mais aussi de la symbiose avec des organismes fixateurs d'azote qui utilisent le diazote gazeux présent dans l'air et forment des ions nitrates assimilables par les plantes. Les éléments minéraux présents dans le sol peuvent être perdus

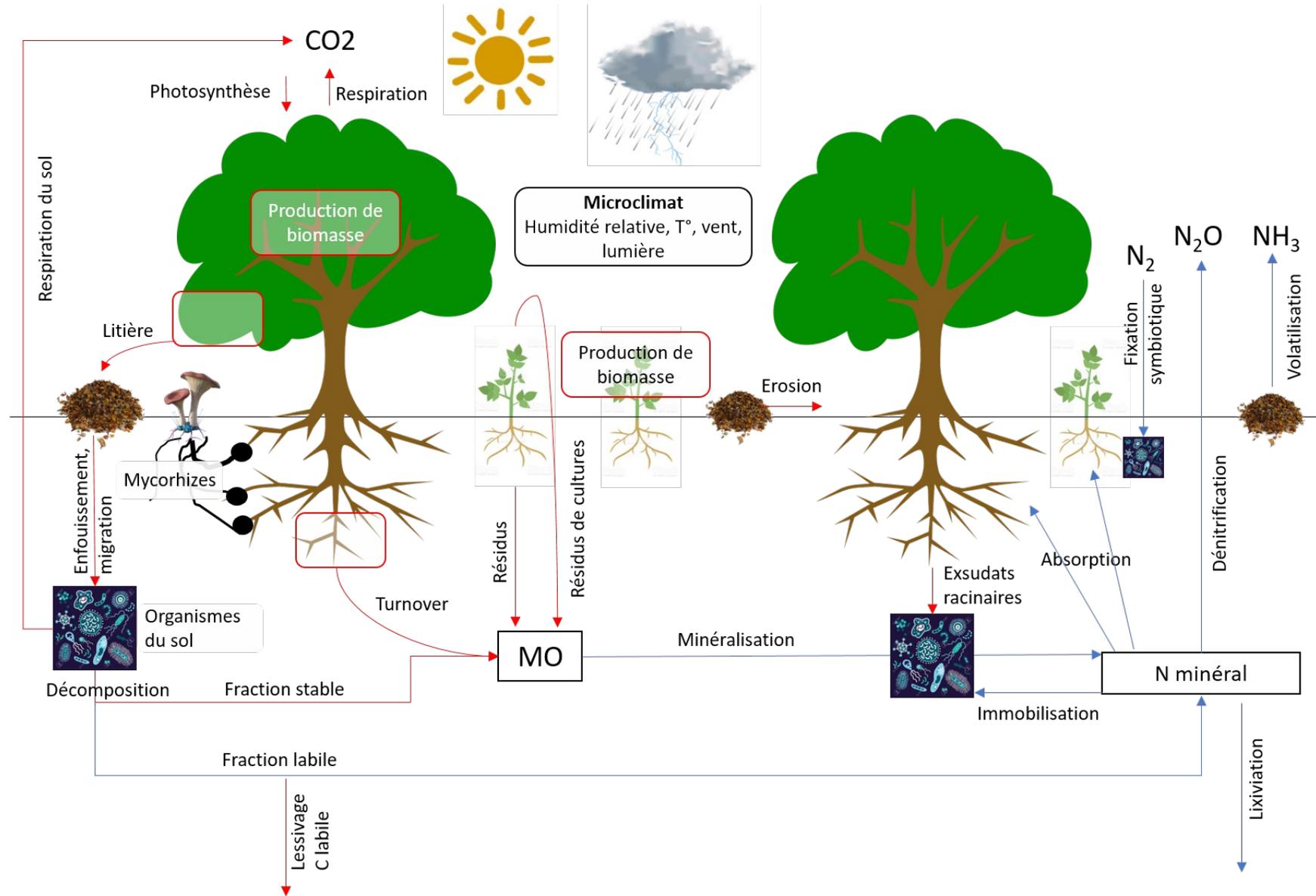


Figure 1: Cycle du carbone (en rouge) et de l'azote (en bleu). Modifié d'après Chambre d'agriculture Occitanie 2011 ; Duparque 2017 ; Ramananjatovo 2019.

par lixiviation (NO_3^-) ou lessivage (carbone organique labile), c'est-à-dire entraînés vers les horizons profonds du sol par la percolation de l'eau. Ils peuvent également être perdus par érosion hydrique ou éolienne à la surface du sol. Enfin l'azote peut être perdu par volatilisation, ou par dénitrification. La volatilisation a lieu sous l'effet de la température et du pH ; l'azote minéral est transformé en NH_3 , émis dans l'atmosphère. La dénitrification s'effectue en conditions anaérobies, il en résulte une émission de N_2O dans l'atmosphère, qui est un gaz à effet de serre (Chambre d'agriculture Occitanie 2011 ; Duparque 2017).

Parmi les étapes de ces cycles, la respiration du sol et la minéralisation de l'azote vont être détaillées ici.

2.2.2 Respiration du sol

La respiration est une réaction chimique qui intervient au niveau cellulaire, au cours de laquelle se produit un échange d'électrons (réaction d'oxydo-réduction). Elle permet la production d'énergie nécessaire au fonctionnement cellulaire via la molécule d'Adénosine TriPhosphate (ATP). La réaction de respiration nécessite un substrat organique comme le glucose qui peut provenir de la digestion des aliments (organismes hétérotrophes) ou bien pour les plantes, de la photosynthèse ou de la dégradation des réserves stockées dans les tissus (organismes autotrophes) (Delogu 2013).

La réaction de respiration peut s'écrire de la façon suivante (Delogu 2013):



La respiration capte donc du dioxygène et libère du CO_2 et de la vapeur d'eau. On peut ainsi étudier les flux de respiration en mesurant les flux de CO_2 émis par des organismes ou par un écosystème (Blanke 1996 ; Delogu 2013 ; Scandellari et al. 2015)

La respiration du sol désigne l'ensemble des flux de respiration émis par les racines des plantes et les autres organismes vivants du sol (figure 2). La respiration dite autotrophe du sol est liée à l'activité des végétaux. Elle correspond à la respiration des racines et de leur zone d'influence, c'est-à-dire les organismes associés aux racines (symbioses mycorhiziennes ou bactériennes, autres organismes présents dans la rhizosphère). Ces organismes minéralisent les exsudats racinaires et peuvent utiliser l'énergie issue de cette minéralisation pour décomposer la matière organique du sol présente dans l'environnement proche. La respiration hétérotrophe est liée à l'activité de décomposition de la litière et de la matière organique du sol par la macro, méso et micro faune du sol qui ne sont pas influencées par la rhizosphère (Delogu 2013 ; Scandellari et al. 2015) En pratique, la distinction entre ces deux types de flux est très difficilement réalisable in situ du fait de l'hétérogénéité du sol et de la difficulté de délimiter la rhizosphère d'une part et parce que l'activité respiratoire d'organismes hétérotrophes influencés par la rhizosphère représente une part importante des flux de CO_2 émis par le sol (Delogu 2013 ; Scandellari et al. 2015).

La respiration du sol est influencée par de nombreux paramètres. Dans la littérature, la température du sol est souvent considérée comme le paramètre principal qui influence la respiration du sol (Delogu 2013 ; Scandellari et al. 2015). Cependant, comme la respiration du sol comprend à la fois la respiration des racines, des organismes associés aux racines et des organismes hétérotrophes en dehors de la rhizosphère, ces trois compartiments ne sont pas influencés de la même façon par la température du sol et d'autres facteurs peuvent jouer un rôle important. C'est pourquoi certaines études se sont intéressées aux autres facteurs qui influencent la respiration du sol.

Ainsi, l'humidité du sol est un facteur majeur de régulation de la respiration du sol. Lorsque la teneur en eau du sol est faible, la respiration est limitée et lorsque le sol est saturé en eau, le manque d'oxygène empêche la respiration (Delogu 2013). Plus largement, les propriétés physiques du sol telles que la texture et la structure ont un rôle important. La texture influence non seulement la rétention de l'eau et la réserve utilisable par les plantes, mais elle joue aussi un rôle dans la

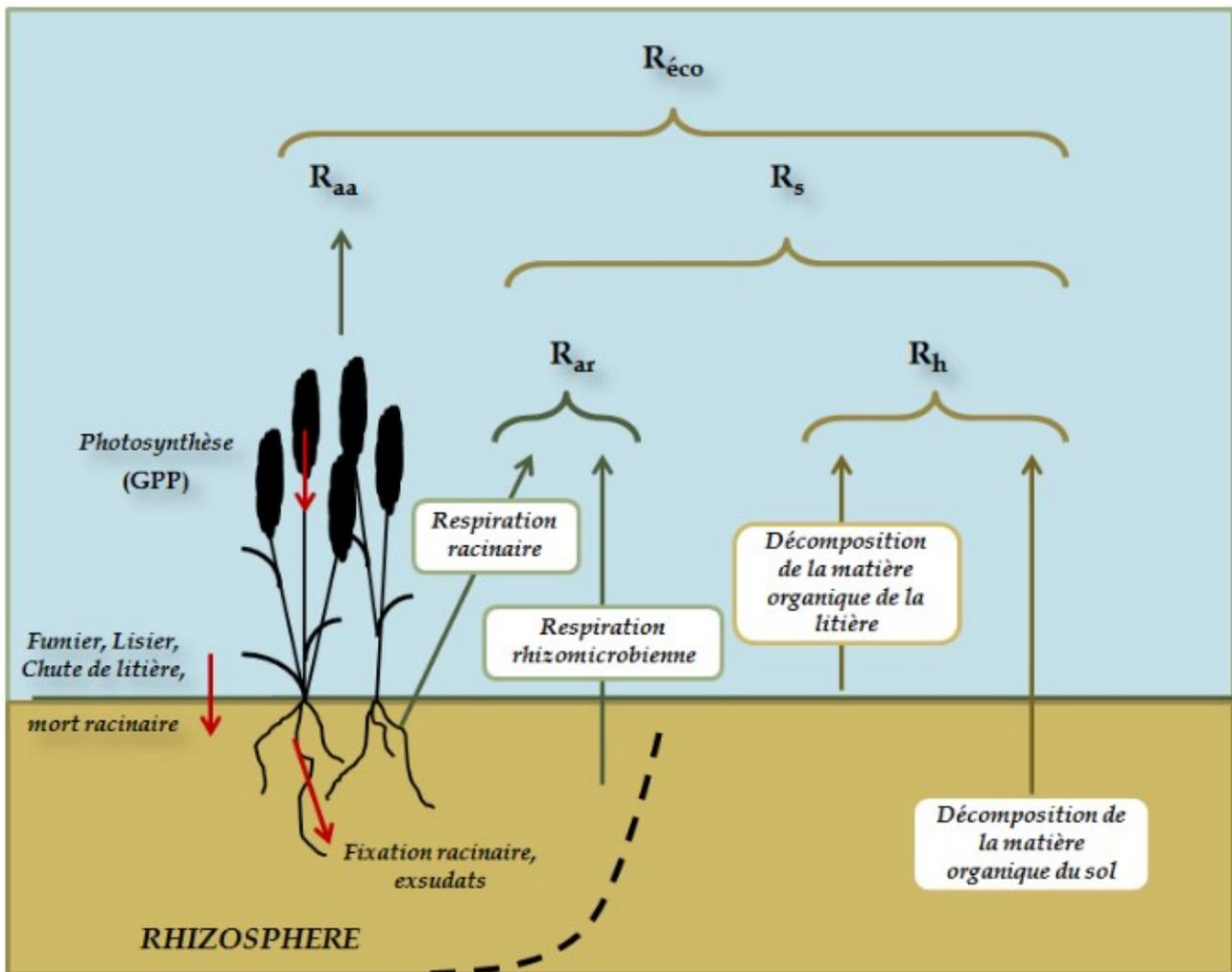


Figure 2: Schéma des flux de respiration du sol, des plantes et de l'écosystème (Delogu 2013).
 Réco : Respiration écosystème, R_{aa} : Respiration autotrophe des parties aériennes, R_{ar} :
 respiration autotrophe des racines, R_h : respiration hétérotrophe, R_s : respiration du sol, GPP :
 Production primaire brute.

formation et le maintient du complexe argilo-humique (CAH). Le CAH protège la matière organique de la minéralisation par les micro-organismes, limitant la respiration (Chambre d'agriculture Occitanie 2011 ; Delogu 2013).

Ensuite la respiration du sol et en particulier la respiration racinaire est liée à l'état physiologique des plantes, lorsque l'activité photosynthétique et la production de biomasse sont élevées, cela favorise l'apport de métabolites dans les racines et la croissance racinaire et stimule ainsi la respiration des racines. Certains auteurs ont en effet observé une respiration du sol plus importante du printemps à l'automne, durant la période de croissance végétale et de fructification (Blanke 1996 ; Scandellari et al. 2015) La respiration racinaire est aussi liée à la composition biochimique des tissus racinaires qui influence la croissance racinaire (coûts de production et d'entretien énergétique des composés biochimiques) (Delogu 2013 ; Scandellari et al. 2015).

Enfin, les interventions anthropiques de gestion des cultures peuvent influencer la respiration du sol. D'abord la quantité et la qualité des résidus de culture déterminent leur capacité à être dégradé. Un composé très ligneux sera difficilement décomposable alors qu'un composé plus riche en cellulose sera décomposé plus facilement. D'autre part, les amendements, notamment l'apport de MO par les fumiers ou lisiers augmentent la teneur en carbone organique et améliorent la fertilité du sol, favorisant ainsi la production de biomasse par les cultures. Ils peuvent donc favoriser la respiration du sol. Enfin, le travail du sol modifie sa structure et détruit les agrégats, ce qui peut augmenter la disponibilité de la MO pour les micro-organismes, et donc augmenter les flux de respiration (Delogu 2013).

2.2.3 Minéralisation de l'azote

La minéralisation de l'azote comprend la minéralisation brute et la minéralisation nette (Valé 2006). La minéralisation brute correspond à la transformation d'azote organique, contenu dans la matière organique du sol en molécules simples d'azote minéral sous l'action des micro-organismes du sol. Cette transformation se fait en plusieurs étapes.

D'abord l'ammonification est la transformation de l'azote organique en ammonium (NH_4^+) par des micro-organismes hétérotrophes qui utilisent les substrats carbonés comme source d'énergie. Ils peuvent également utiliser le carbone et l'azote pour constituer leurs propres cellules et métabolites. Lorsque les conditions d'humidité et de température sont non limitantes, l'ammonium est transformé en nitrate (NO_3^-) par des bactéries hétérotrophes, c'est la nitrification (figure 3). La minéralisation brute est toujours associée à l'organisation, c'est-à-dire l'assimilation d'azote minéral par les micro-organismes. L'organisation peut se produire après amendement par des fertilisants azotés ou du carbone soluble. Ce phénomène se produit lorsque le rapport C/N de l'amendement est supérieur à environ 25. Cet azote assimilé n'est alors plus disponible dans le sol pour les plantes, on parle alors de « faim d'azote ». Il pourra être à nouveau disponible lors du renouvellement de la biomasse microbienne.

La minéralisation nette correspond à la différence entre la minéralisation brute et l'organisation et indique la mise à disposition d'azote minéral dans le sol pour les plantes par l'action des micro-organismes. La minéralisation nette est donc un indicateur plus utilisé en agronomie pour connaître la quantité d'azote disponible pour les cultures, d'autant plus que la distinction entre minéralisation brute et organisation est difficile à mesurer en conditions de champ (Valé 2006). Ainsi, la minéralisation de l'azote découle de la dégradation de la matière organique du sol par les micro-organismes, elle est donc sous l'influence des conditions pédo-climatiques. En effet, comme pour la respiration du sol l'activité des micro-organismes est régulée par de nombreux paramètres comme la température, l'humidité et les caractéristiques du sol qui déterminent la capacité de la matière organique à être facilement dégradée (teneur en MO, en argile, structure, etc) (Valé 2006 ; Delogu 2013).

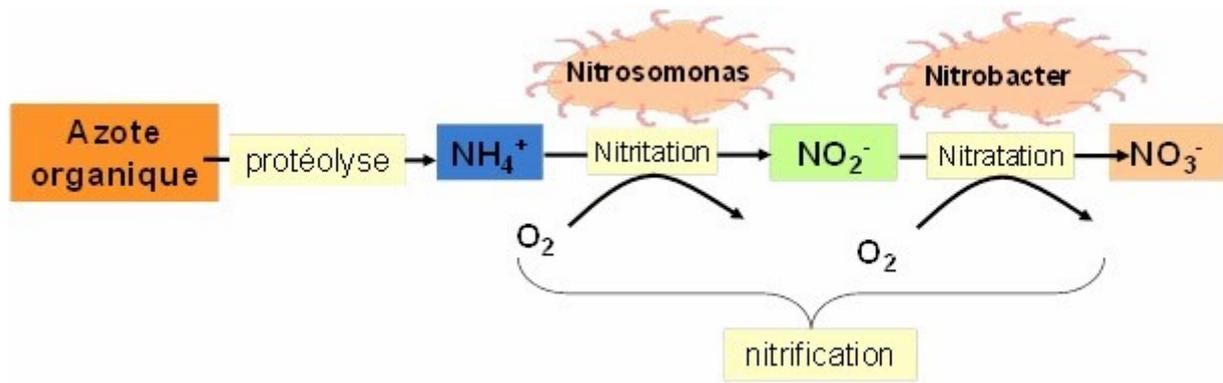


Figure 3: Déroulement de la minéralisation brute de l'azote dans le sol. (L'agro Reporter 2013)

Chaque étape du cycle de la MO peut donc être influencée différemment par les conditions pédoclimatiques (Chambre d'agriculture Occitanie 2011), par les espèces végétales et animales présentes sur place et par les pratiques agricoles (Duparque 2017 ; Dequiedt, Ranjard 2021). Par la suite, on s'intéressera au cas des systèmes agroforestiers et en particulier à l'impact de la présence d'arbre sur l'activité biologique du sol, impliquée dans le cycle de la matière organique.

2.3 Systèmes agroforestiers : influence des arbres sur l'activité biologique du sol

(Nair 1993) recense les types de systèmes agroforestiers (SAF) rencontrés à travers le monde en zone tropicale et subtropicale. Il explique comment ces systèmes sont mis en place, les bénéfices qu'ils fournissent et les risques à éviter pour garantir une production viable.

2.3.1 Apport de matière organique, de nutriments et d'eau au sol

D'après (Nair 1993), l'un des principaux intérêts des arbres en SAF est l'apport de matière organique au sol. L'arbre produit de la biomasse par la litière et les racines, ce qui permet d'améliorer et de maintenir le stock de MOS (Nair 1993 ; Traoré et al. 2002 ; Liagre et al. 2017 ; Pardon et al. 2017).

En zone tempérée, des études ont également observé ces effets. En Belgique, (Pardon et al. 2017) ont observé que dans des parcelles bordées de haies d'arbres matures (15-47 ans) (« Boundary Planting Field »- BPF), avec des zones témoins sans haie, les concentrations en carbone organique du sol, (SOC), azote total (N), sodium (Na), potassium (K), magnésium (Mg) et dans une moindre mesure, en phosphore (P) étaient plus importantes dans les zones bordées d'arbres que dans les zones témoins où la parcelle n'était pas bordée d'arbres. Ces différences diminuaient de façon exponentielle à mesure que la distance par rapport à la haie augmentait. A une distance de 30m de la haie, les teneurs en nutriments étaient similaires entre les zones témoins et les zones bordées d'arbres. En effet, les analyses ont montré une interaction entre les facteurs distance à la haie d'arbres et présence/absence d'arbres. Par ailleurs, les auteurs ont observé un effet de la taille des arbres, lorsque les arbres de la haie étaient plus grands, les gradients de concentration en SOC, Na, N, K et P étaient plus élevés dans un intervalle de 2 à 30m de la haie. Dans d'autres types de SAF, en « alley cropping » (rangs d'arbres implantés dans des parcelles de grandes cultures, espacés de 24 à 26m) avec de jeunes arbres, aucune variation significative des propriétés du sol n'a été observée en fonction de la distance par rapport au rang d'arbres. Cependant les auteurs considèrent que les résultats obtenus sur les parcelles en BPF avec des arbres matures sont transférables à des systèmes en alley cropping matures. En effet, d'après les résultats observés dans la parcelle en BPF qui indiquent que l'augmentation de la teneur en SOC est fortement corrélée à l'augmentation de la taille des arbres, ils supposent que l'absence de différence dans les parcelles en alley cropping s'explique par le jeune âge et la taille réduite des arbres. Les arbres en alley cropping sous des climats tempérés ne pourraient donc pas exercer une influence significative sur la matière organique du sol et la teneur en nutriments avant au moins 3 à 5 ans d'implantation (Pardon et al. 2017).

Ces résultats correspondent en partie à ceux d'autres études réalisées en milieu tempéré et méditerranéen. (Bambrick et al. 2010) ont observé au Canada les teneurs en SOC dans des parcelles conduites en agroforesterie avec différentes espèces (Peuplier, Pin) et sur différents sites. Les teneurs en SOC étaient plus élevées dans un intervalle de 0.75 à 1m autour du rang par rapport au reste du champ. Par ailleurs, en France, (Cardinael et al. 2015) ont observé dans des SAF en climat méditerranéen que la teneur en SOC était plus élevée dans le rang. Dans ces deux études, il n'y a pas eu de gradient observé de la teneur en SOC en fonction de la distance aux arbres. Pour l'étude réalisée au Canada, la concentration en NH_4^+ et NO_3^- était fortement corrélée à la teneur en SOC,

ce qui laisse supposer un effet bénéfique de tels systèmes pour la fertilité du sol (Bambrick et al. 2010).

Par ailleurs, les arbres peuvent jouer un rôle de « filet de sécurité » pour empêcher ou limiter le lessivage des nutriments dans les horizons profonds du sol. En Floride, (Allen et al. 2004) ont étudié les concentrations en ammonium et en nitrate dans les différents horizons du sol dans un verger de noyers de pécan avec du coton cultivé dans l'inter-rang. Ils ont observé que le système racinaire des arbres permettait de réduire significativement les concentrations en nitrates à des profondeurs de 30 et 90cm, concluant ainsi à un effet « filet de sécurité » joué par les arbres qui prélèvent les nitrates en excès pour la culture, drainés vers les horizons plus profonds par l'eau. Cet effet a aussi été démontré pour le nitrate seulement, au Canada sur des peupliers âgés de 5 à 8 ans par (Bergeron et al. 2011). Dans cette étude, les peupliers réduisaient de 227kg N.ha⁻¹ et 30kgN.ha⁻¹ les nitrates lessivés la première année et la deuxième année d'étude respectivement. En revanche, les peupliers ne réduisaient pas le lessivage d'ammonium qui était plus élevé en présence du système racinaire des arbres. Cependant les quantités de NH₄⁺ lessivés dans ce cas étaient bien inférieures aux quantités de NO₃⁻ lessivés lorsqu'il n'y avait pas d'arbre. Ainsi, si l'effet filet de sécurité n'est pas toujours observé pour l'ammonium, ces études montrent qu'il est réel pour le nitrate, qui pose plus de problèmes puisqu'il peut être lessivés en plus grandes quantités que l'ammonium (Bergeron et al. 2011).

D'après (Nair 1993), un effet probable mais non démontré des arbres en SAF est qu'ils participent au recyclage et libération des nutriments dans le sol en les puisant dans des horizons plus profonds que les couverts herbacés et en les relarguant en surface par l'activité racinaire. Cet effet n'est pas vérifié dans tous les systèmes arborés. (Poszwa et al. 2002) ont montré que dans les forêts tropicales, le recyclage du calcium se faisait principalement dans les horizons superficiels du sol.

Ensuite, dans les systèmes agroforestiers, les arbres ont un effet sur l'eau arrivant au sol en terme de quantité et de distribution ce qui influence l'apport de nutriments par la pluie et les boues (Nair 1993). Ils protègent de l'érosion hydrique et éolienne, ce qui participe aussi à réduire les risques de lixiviation ou de lessivage (Nair 1993 ; Liagre et al. 2017). Ils ont aussi des effets indirects sur les propriétés physiques du sol (porosité liée au passage des racines, maintien de la structure) (Jones et al. 2004), chimiques sur le pH, la salinité et le potentiel RedOx, sur le micro-climat en atténuant les conditions extrêmes et sur la vie du sol en améliorant la qualité de la litière par la diversité d'espèces présentes dans la parcelle (Nair 1993 ; Wachs 2016). En SAF, les arbres ont donc un rôle important dans le maintien du cycle de la matière organique, principalement en tant que source de MO, filet de sécurité contre le lessivage et dans certains cas, source de nutriments prélevés sur la roche mère.

Cependant, les systèmes agroforestiers peuvent présenter certaines limites car les arbres peuvent entrer en compétition avec les cultures pour la lumière, l'eau et les nutriments et il peut y avoir des effets allélopathiques de certaines espèces qui empêchent ou rendent difficile la croissance des autres espèces présentes. Par ailleurs la modification du microclimat et en particulier de l'humidité et de la température de l'air peut favoriser l'apparition de certaines maladies, c'est pourquoi les espèces choisies et la configuration des parcelles doivent être réfléchies en amont afin de limiter ces risques (Liaigre et al. 2017 ; Warlop et al. 2017).

Dans un système agroforestier, les racines vivantes en activité sont aussi en interaction avec les autres organismes du sol, influençant ainsi l'activité biologique.

2.3.2 Activité biologique dans la rhizosphère

La rhizosphère, zone du sol influencée par la présence et l'activité des racines vivantes des plantes, est considérée comme la zone du sol où l'activité microbienne est la plus intense en raison de la

plus grande concentration en carbone et en éléments minéraux (Grayston et al. 1997 ; Jones et al. 2004). Cette concentration accrue est due à la rhizodéposition, c'est-à-dire l'apport de matière organique carbonée dans le sol par les racines vivantes (Grayston et al. 1997 ; Fontaine et al. 2003). La matière organique présente dans cette zone provient également de la litière (Nair 1993 ; Grayston et al. 1997 ; Liagre et al. 2017). Cet apport peut se faire sous plusieurs formes :

- Les exsudats hydrosolubles sont des substances de faible poids moléculaire (dont les gaz) dont le transfert vers le milieu extérieur se fait par voie passive, sans activité métabolique particulière (Grayston et al. 1997).
- Les sécrétions qui permettent le relargage d'éléments de poids moléculaire élevé par voie active (Grayston et al. 1997).
- Les lysats qui proviennent de l'autolyse de cellules épidermiques sénescents (Grayston et al. 1997).
- Le mucilage est une substance gélatineuse constituée de molécules de poids moléculaire élevé, qui couvre l'extrémité racinaire afin de permettre un bon contact entre la racine et le sol (Jenny, Grossenbacher 1963 ; Grayston et al. 1997).

L'apport de matière organique fraîche dans le sol peut entraîner temporairement une prolifération de micro-organismes et une minéralisation accrue de la matière organique, ce phénomène est appelé « Priming effect » (Fontaine et al. 2003). Les mécanismes de rhizodéposition décrits précédemment, en apportant des substances carbonées et des nutriments dans l'environnement racinaire, peuvent provoquer cet effet (Grayston et al. 1997 ; Jones et al. 2004). Le relargage de carbone dans la rhizosphère et sa minéralisation par les micro-organismes sont des processus très rapides, la demi-vie de ce processus est de 0,5 à 2h pour la plupart des sucres et acides organiques et aminés (Jones et al. 2004). Cela signifie que les flux de carbone dans le continuum sol-plante peuvent être très rapides car les composants impliqués peuvent avoir une demi-vie de 3 à 6h dans la rhizosphère de plantes en croissance. Une partie des composants carbonés exsudés sont incorporés dans la biomasse microbienne, dont le turnover est plus lent, entre 30 et 90 jours (Jones et al. 2004).

Selon Grayston et al. (1997), les plantes pérennes relarguent plus de carbone organique par rhizodéposition que les plantes annuelles. Ce carbone organique relargué peut ensuite être utilisé pour la respiration microbienne. Les arbres peuvent donc être une source supplémentaire non négligeable de carbone dans les systèmes agroforestiers. De plus, la présence de micro-organismes dans la rhizosphère augmente l'exsudation racinaire. Cette stimulation s'observe en présence d'organismes libres, dans des couverts herbacés ou ligneux. Le même auteur indique que la majorité des plantes établissent des symbioses mycorhiziennes et que les arbres qui forment des associations symbiotiques exsudent plus que les espèces non symbiotiques.

Les exsudats racinaires peuvent favoriser la mise à disposition des minéraux pour les plantes par effet direct, par la modification chimique de l'environnement par différents mécanismes : prélèvement d'eau et de nutriments, prélèvement ou relargage de protons et de composés organiques, respiration, etc. Ces mécanismes modifient localement les conditions physiques du milieu comme le pH, le potentiel redox ou hydrique (Grayston et al. 1997 ; Jones et al. 2004). Il peut aussi s'agir d'effets indirect en augmentant la quantité de substrat carboné qui peut favoriser l'activité des micro-organismes et ainsi rendre disponible pour les plantes certains nutriments comme l'azote sous forme d'ammonium et de nitrate. Les molécules émises par les racines peuvent aussi servir à attirer chimiquement les micro-organismes symbiotiques (Grayston et al. 1997).

Les arbres, par l'apport de matière organique au sol et l'activité des racines peuvent donc stimuler l'activité biologique du sol, qui influence elle-même l'activité des racines. Cependant, la relation entre quantité de substrat et activité biologique n'est pas simple puisque beaucoup de facteurs entrent en interaction (Delogu 2013). De plus, selon le type de SAF et les pratiques agricoles,

l'influence des arbres peut varier d'une situation à l'autre (Warlop et al. 2017). Cas des vergers-maraîchers : effet de l'association arbres et cultures légumières sur les paramètres du sol et l'accès aux nutriments

2.3.3 Modification du micro-climat du sol en verger-maraîcher

Certains effets des arbres dans les SAF s'appliquent particulièrement au cas des vergers-maraîchers (VM). D'abord, ils modifient le micro-climat, c'est-à-dire les « conditions climatiques dans un espace homogène restreint, défini à l'échelle du mètre et de l'heure » (Wachs 2016).

En effet, une étude menée en Belgique dans le cadre d'un travail de stage sur deux parcelles de vergers-maraîchers a montré que les arbres jouent un rôle de régulation sur le micro-climat des parcelles. En effet, la température du sol et la vitesse du vent étaient inversement corrélées à la distance et la densité d'arbres. Aussi, l'humidité relative était corrélée positivement à la distance et la densité d'arbres. L'amplitude des températures journalières était également plus restreinte lorsque la distance à l'arbre était faible et la densité d'arbres élevée (Wachs 2016).

La température du sol dans l'environnement racinaire des plantes est un facteur clé du développement des plantes puisqu'elle affecte la cinétique des réactions biochimiques. Dans le cas des plantes, il s'agit en particulier de l'absorption de l'eau et des nutriments par les racines (Díaz-Pérez 2009). Les taux de respiration et de consommation d'oxygène des racines peuvent doubler pour une augmentation de la température dans la zone racinaire (RZT) de 10°C (Gonzalez-Fuentes et al. 2016). Ainsi, le développement et la production de cultures maraîchères peuvent être fortement affectés par des variations extrêmes de RZT (Gonzalez-Fuentes et al. 2016 ; Díaz-Pérez 2009). Le rôle de régulation et d'atténuation du vent et des températures extrêmes joué par les arbres a donc un grand intérêt pour le développement de SAF comme les vergers-maraîchers puisqu'ils peuvent assurer un environnement relativement stable, favorable à la croissance et la production de cultures légumières (Wachs 2016).

De plus, la régulation du micro-climat par les arbres influence l'activité biologique du sol. D'abord le micro-climat influence l'activité et l'exsudation racinaire : lorsque les températures augmentent, l'activité racinaire peut augmenter (jusqu'à une température maximale de fonctionnement cellulaire) (Grayston et al. 1997 ; Gonzalez-Fuentes et al. 2016) Ensuite la régulation du micro-climat influence l'activité des micro-organismes du sol, dépendante de la température et de l'humidité et influencée par les exsudations racinaires (Hatfield, Walthall 2015).

2.3.4 Répartition spatiale et prélèvement des nutriments dans le sol en verger-maraîcher

Parmi les effets des arbres évoqués plus haut, la question du prélèvement des minéraux dans les différents horizons du sol se pose en verger-maraîcher. En effet, si le phénomène de prélèvement en profondeur par les arbres et de relargage dans les horizons supérieurs n'est pas réel pour tous les peuplements arborés, il est nécessaire de chercher à le favoriser en verger-maraîcher (Warlop et al. 2017). En effet, pour qu'un système agroforestier soit viable, il faut que les arbres puissent explorer les horizons profonds du sol pour y prélever leurs nutriments afin de ne pas concurrencer les cultures dont le système racinaire se développe moins en profondeur (Nair 1993 ; Warlop et al. 2017). Il est donc conseillé de chercher des associations avec des arbres qui développent leurs racines en profondeur et peu latéralement (Nair 1993). Cela peut être favorisé par les pratiques agricoles comme la présence d'enherbement au pied des arbres ou un travail mécanique annuel, forçant ainsi l'exploration racinaire en profondeur (Warlop et al. 2017). Dans le cas des vergers-maraîchers, ce problème peut se poser, et d'autant plus que les deux cultures en place peuvent avoir des besoins en nutriments importants pour la production de fruits par les arbres et de légumes par les bandes maraîchères, il faut donc veiller à ce que les besoins ne soient pas les mêmes au même

moment. (Warlop et al. 2017) recommandent par exemple de favoriser des cultures maraîchères d'hiver implantées dans des vergers de fruits d'été afin de répartir les besoins nutritifs sur l'année. Ils conseillent également de respecter un espacement minimal de 8 à 10m entre deux rangs d'arbres selon les régions, pour éviter une concurrence accrue entre les cultures pour l'eau, la lumière et les nutriments.

De plus, si les arbres permettent un apport de MO et de nutriment au sol, les auteurs ne s'accordent pas toujours sur un effet distance à l'arbre (Pardon et al. 2017 ; Bambrick et al. 2010). Ainsi, dans un système de VM où il peut y avoir plusieurs bandes maraîchères entre deux rangs d'arbres, les apports en MO peuvent se faire dans un périmètre restreint autour de l'arbre et ainsi influencer peu les bandes maraîchères, ou bien il peut y avoir un gradient en fonction de la distance à l'arbre, donc une réserve nutritive différente selon les bandes maraîchères. Ce deuxième cas de figure correspond à ce qui a été observé dans des champs en grande culture dans l'étude de (Pardon et al. 2017)

2.4 Pratiques agricoles en verger-maraîcher et influence sur l'activité biologique du sol

En plus de la diversité de situations possibles concernant l'effet des arbres en verger-maraîcher, les pratiques agricoles peuvent influencer significativement l'activité biologique du sol, même pour un même type de SAF. En effet, les vergers-maraîchers présentent une diversité de configuration et de pratiques de gestion (Warlop et al. 2017) qui peuvent conduire à des effets variés sur l'activité biologique du sol.

Concernant les effets néfastes que peuvent avoir les arbres sur la matière organique dans les systèmes agroforestiers, (Nair 1993) évoque l'exportation de la biomasse produite par les arbres lorsqu'ils sont coupés pour du bois d'œuvre ou retirés pour renouveler la parcelle, ce qui provoque un fort appauvrissement soudain du sol en matière organique et donc en nutriments. Cette question se pose en VM puisqu'une partie de la biomasse produite est exportée : bois de taille, cultures légumières.

Ensuite, les pratiques de travail du sol et de gestion phytosanitaire peuvent influencer l'activité et les populations microbiennes du sol. (Leskovar et al. 2016) ont observé que le strip tillage (labour à 15-20cm de profondeur alterné avec des bandes non travaillées) a permis d'augmenter la biomasse microbienne, les bactéries actives, la population fongique et les nématodes par rapport à un labour conventionnel sur des cultures de melons triploïdes. Cependant le strip-tillage a fait augmenter considérablement la population de nématodes bioagresseurs des plantes et a réduit les teneurs en phosphore et en nitrates comparé au labour conventionnel (Leskovar et al. 2016).

Concernant les intrants utilisés, une étude menée à Gembloux en Belgique pendant 7 ans a évalué les différences d'activité biologique du sol entre un verger de cerisiers conduit de façon conventionnelle et un verger de pommiers conduit en agriculture biologique (Jamar et al. 2009). En particulier, les mesures ont porté sur la respiration basale (BAS), la respiration induite par substrat (SIR) et le flux de CO₂ *in situ* ainsi que sur la biomasse et abondance de vers de terres. Les résultats ont montré que BAS, SIR et la respiration *in situ* étaient significativement plus élevés dans le verger en agriculture biologique par rapport au verger conventionnel. Les valeurs de biomasse et densité de vers de terre ont été faibles et en diminution en conventionnel et plus élevées et en augmentation dans le verger en agriculture biologique.

Les arbres influencent donc différemment l'activité biologique du sol en fonction de leur âge et leur taille, de la distance et de l'espèce, mais d'autres facteurs jouent aussi un rôle, notamment l'itinéraire technique mis en place, qui comprend les amendements et intrants phytosanitaires, ainsi que la gestion mécanique du sol, s'il est couvert ou non, travaillé en profondeur ou non.

Ce travail de stage a donc pour objectif de comprendre comment le cycle de la matière organique est influencé par les arbres et la gestion des parcelles dans le cas d'un verger de pommier conduit en production fruitière intégrée et d'un verger-maraîcher.

3 Questionnements scientifiques, problématique et hypothèses

Le travail présenté ici s'appuie sur la problématique suivante :

Comment l'activité biologique de dégradation et de transformation de la matière organique est-elle influencée par la présence d'arbres en verger, avec ou sans association de cultures légumières ?

De cette problématique découlent les questionnements scientifiques suivants :

- Quelle est l'influence des arbres fruitiers sur l'activité biologique de transformation de la matière organique du sol dans une parcelle cultivée ?
- Est-ce que les arbres fruitiers, les cultures et légumières et l'enherbement permanent influencent différemment l'activité biologique du sol ?
- Est-ce que l'agroforesterie favorise l'activité biologique du sol par rapport à une gestion conventionnelle de verger ?
- Est-ce que l'itinéraire technique choisi influence l'activité biologique du sol ? (Fertilisation, travail du sol)

Les premiers résultats de thèse de Toky Ramananjatovo (2018 – 2022) sur le verger-maraîcher ont montré une teneur en matière organique plus élevée sous les arbres que sur les bandes maraîchères. Dans ce travail, on a cherché à confirmer cette observation et d'autres hypothèses ont été émises à partir de cette hypothèse principale et de la bibliographie.

Hypothèse principale (H) : La teneur en MO est plus élevée à proximité des arbres et diminue selon un gradient d'éloignement au rang d'arbres.

Hypothèse 2 (H2) : L'augmentation de la teneur en MO entraîne une augmentation de l'activité biologique de dégradation de la MO du sol. Celle-ci est plus importante à proximité des arbres et diminue selon un gradient d'éloignement à l'arbre. On s'intéresse en particulier à l'activité de respiration du sol et de minéralisation de l'azote du sol.

D'autres facteurs liés à la gestion de la parcelle (itinéraire technique) influencent aussi l'activité biologique du sol et peuvent entrer en interaction avec l'effet des arbres.

Hypothèse 3 (H3) : La couverture du sol et le travail du sol peuvent respectivement favoriser ou ralentir l'activité de dégradation de la MO du sol.

Sous-hypothèse H3.1 : L'enherbement ou végétalisation des inter-rangs, contribue à l'accroissement de la teneur en matière organique et aux activités microbiennes

Sous-hypothèse H3.2 : Le travail du sol stimule l'activité de dégradation de la MO donc elle favorise la respiration du sol et la minéralisation de l'azote.

Hypothèse 4 (H4) : La fertilisation azotée favorise l'activité respiratoire et la minéralisation de l'azote dans le sol.

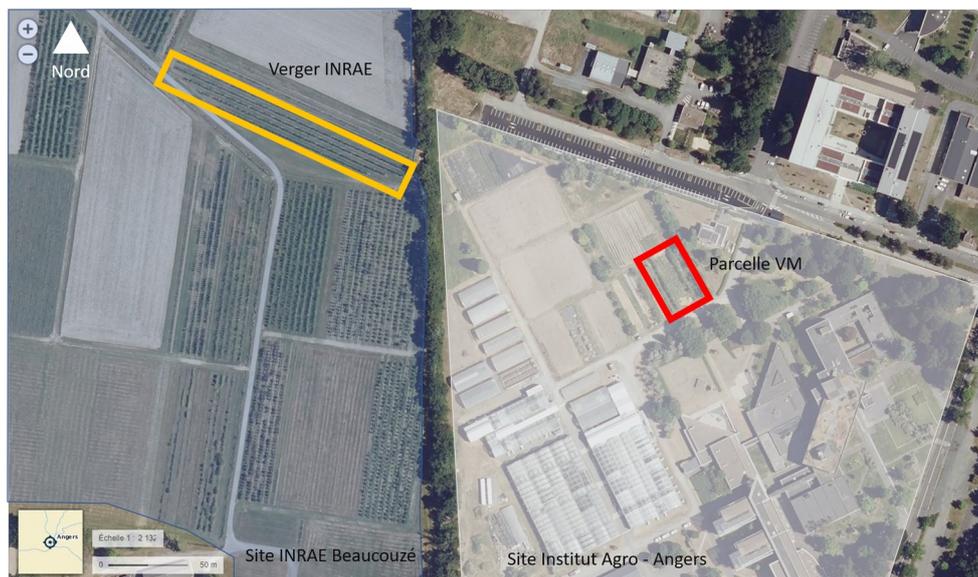


Figure 4: Localisation des parcelles d'étude sur le site de l'INRAE de Beaucouzé et de l'Institut Agro - Angers. Modifié d'après Géoportail 2020

4 Matériels et Méthodes

La méthodologie suivie s'appuie principalement sur des phénomènes mesurables qui découlent de l'activité biologique de minéralisation de la MO du sol. L'étude a donc porté sur les teneurs en MO dans le sol ainsi que la minéralisation de la matière organique, en utilisant comme variables témoins de cette activité la respiration du sol et la minéralisation de l'azote. Des mesures liées à la fragmentation de la matière organique ont également été réalisées.

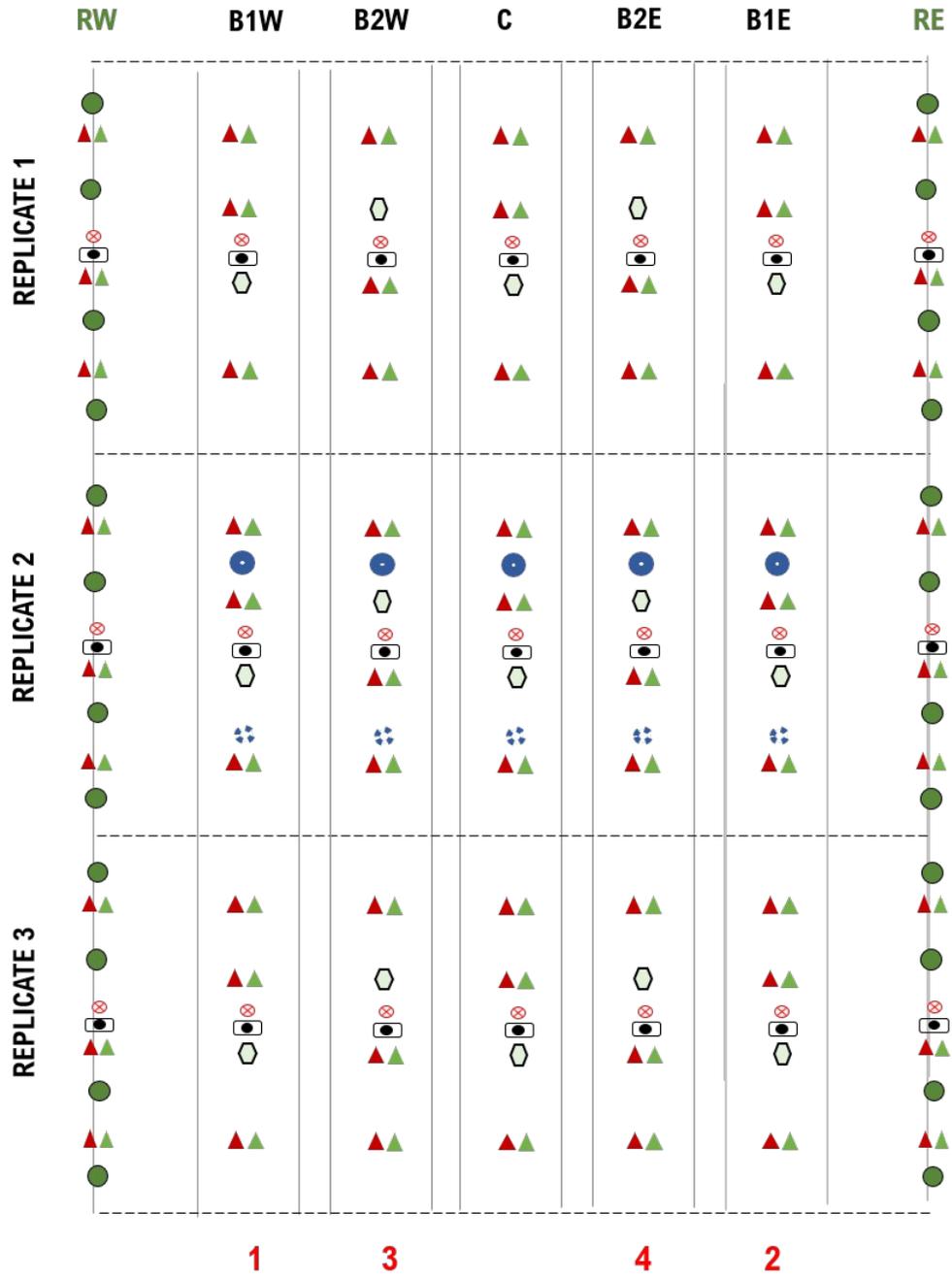
4.1 Présentation des sites d'étude

Les parcelles d'études se situent sur les communes d'Angers et de Beaucouzé, dans le département du Maine-et-Loire (49, figure 4). Le verger-maraîcher (VM) est constitué de 2 rangs de pommiers âgés de 20 ans, espacés de 12 m entre lesquels ont été implantées 5 bandes maraîchères de 1,5m de large. La parcelle a été divisée en 3 blocs constituant 3 répétitions pour les mesures. Chaque bloc forme un rectangle de 12m*6m (figure 5). Dans chaque répétition, sur les rangs d'arbres et les bandes maraîchères, différents capteurs et sondes sont installés afin de mesurer les paramètres climatiques et du sol : humidité, température, ensoleillement. Une station météo est également placée à l'entrée de la parcelle, au Sud. Ces données servent à la réalisation de la thèse. La parcelle d'étude du verger INRAE (INRAE) est constituée de 3 rangs de pommiers âgés de 5 ans. Elle est dédiée à l'étude des stimulateurs de défense des plantes (SDP) et pour cette étude, deux modalités de fertilisation en azote sont étudiées. Une partie des pommiers est carencée en azote, elle reçoit un fertilisant azoté foliaire tandis que l'autre modalité reçoit le fertilisant foliaire et un apport de matière organique au sol au début du printemps. La parcelle est divisée en 16 blocs combinant différentes modalités d'apport d'azote et de SDP. Dans chaque bloc, on compte 6 arbres par rangs, soit 18 pommiers par blocs. Pour l'étude présentée ici, on s'intéresse uniquement au facteur azote et on considère donc seulement les modalités carencée et non carencée en azote (figure 6).

4.2 Description du type de sol

Sur le verger-maraîcher le sol est formé à partir de schiste, à texture limono-sableuse. Il s'agit d'un luvisol redoxisol classique (dégradé avec présence d'hydromorphie). Dans le cadre de la thèse, quatre horizons caractéristiques de ce type de sol ont été identifiés à l'aide d'une fosse pédologique Ag (0-30 cm), Eg (30-50 cm), BTg (50-90 cm) et Cg (90-120 cm). On observe un lessivage des argiles, entraînées dans les horizons profonds sous l'action de l'eau, on a donc des horizons plus rouges en profondeur, et on remarque la présence d'une couche imperméable à 120cm de profondeur (Ramananjatovo 2019). Des mesures et analyses de laboratoires ont été réalisées en 2019 au sein du laboratoire d'AgroCampus Ouest. Les résultats sont présentés dans le tableau 1.

A l'INRAE, le sol est de type limon argilo-sableux superficiel. Les caractéristiques du sol sont indiquées dans le tableau 1. Elles sont issues d'analyses réalisées par le laboratoire AUREA en décembre 2019.



Légende

● Apple tree

□ T/RH probes

● Global radiation sensors

⊗ Ceramic suction lysimeter
+ Tensiometer (30 cm, 90 cm)

C-Flux

1 Ordre de mesure avec le C-Flux

▲▲ Tea bags

⬡ Tube minéralisation

Figure 5: Plan d'échantillonnage de la parcelle verger-maraîcher

Tableau 1: Caractéristique du sol des parcelles Verger-maraîcher et INRAE

Variable mesurée	Verger-Maraîcher	Verger INRAE
Teneur en MO	3-4,5 % (30-45 g.kg ⁻¹) sur 0-20 cm Valeurs plus élevées sur les planches proches des arbres (B1) et témoin (C)	2,3 %
Teneur en eau	18 – 23 % (Teneur massique), variabilité corrélée à celle de la teneur en MO	Non disponible
PHeau	6,34 (0-20cm)	7,3
Teneur moyenne en N organique (VM) / N total (INRAE)	1.37 g.kg ⁻¹ sol sec	0,11 %
Teneur moyenne en C organique	Non disponible	1,3 %
C/N	12.29	12,2
Quantité d'eau à la capacité au champ (VM) / RFU potentielle (INRAE)	240 g H ₂ O.kg ⁻¹ sol sec sur l'horizon de surface (estimée à partir de la teneur en eau le jour suivant un orage)	25 mm (faible)
CEC	Non disponible	7,4 meq/100g (moyen à faible)
Indice de battance	Non disponible	1,08 (moyen)
Indice de compaction	Non disponible	0,5 (faible)

4.3 Plan d'échantillonnage

La figure 5 présente le plan de la parcelle VM et le plan d'échantillonnage suivi pour le travail présenté ici. Les modalités étudiées sur cette parcelle sont les rangs d'arbres Ouest (W) et Est (E), les bandes maraîchères les plus proches des arbres (B1W et B1E), les bandes éloignées des arbres (B2W et B2E) et la bande centrale témoin (C), la plus éloignée des deux rangs d'arbres. Pour certaines variables, les rangs d'arbres n'ont pas été considérés. Selon les analyses, il y a donc 5 ou 7 modalités différentes sur cette parcelle.

La figure 6 présente le plan de la parcelle INRAE et le plan d'échantillonnage suivi pour le travail présenté ici. Les modalités étudiées sur cette parcelle sont les rangs d'arbres (R) et l'inter-rang (IR), ainsi que la modalité azotée (N) et la modalité carencée en azote (SansN). Pour la plupart des analyses, on distinguait les 4 combinaisons de position et d'apport d'azote. Les modalités combinées sont respectivement le rang d'arbres azoté (N_R), l'inter-rang azoté (N_IR), le rang d'arbres carencé (SansN_R) et l'inter-rang carencé (SansN_IR).

Les noms et abréviations des modalités étudiées sont résumées à la fin de la partie 4, dans le tableau 2.

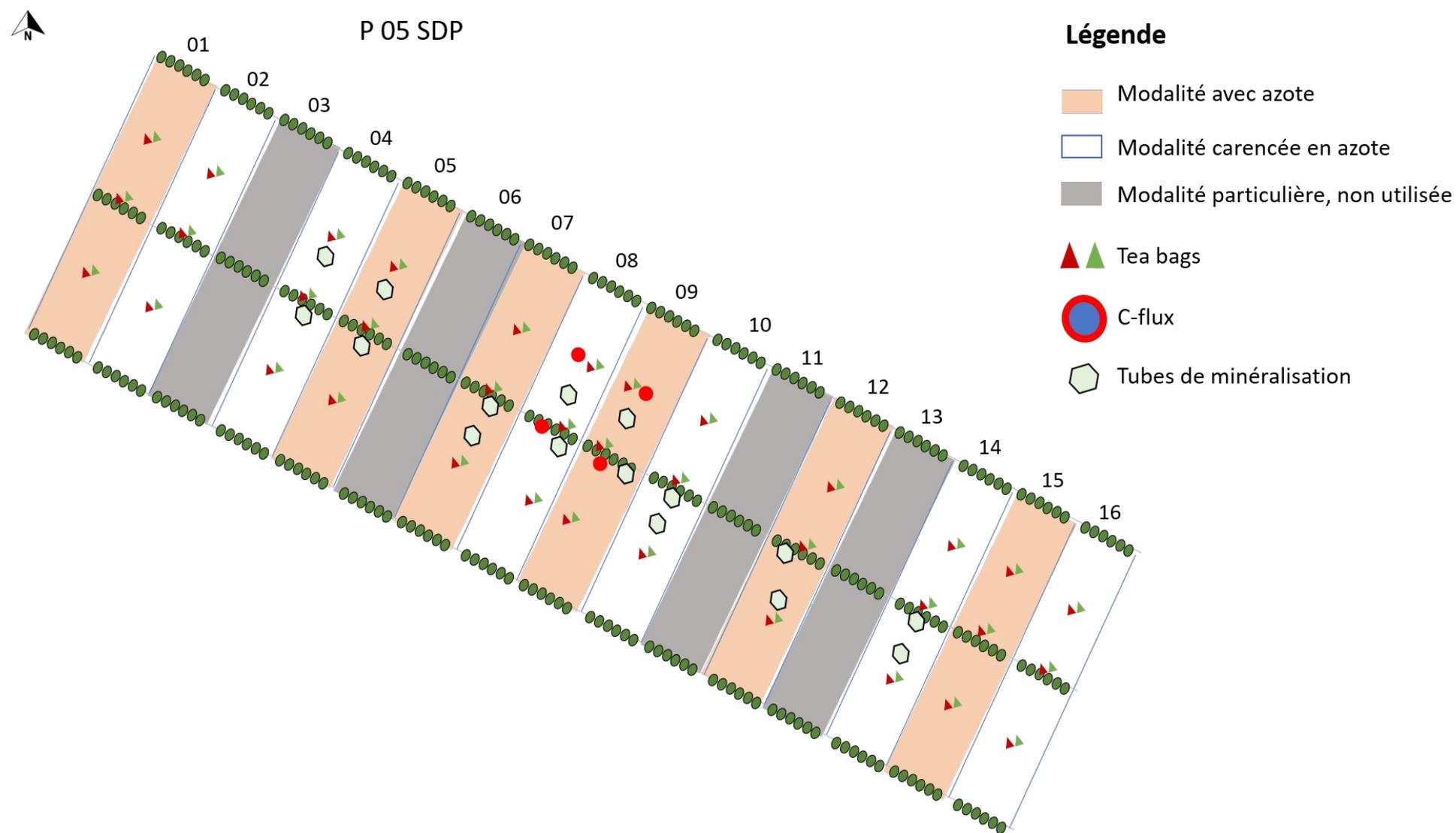


Figure 6: Plan du verger INRAE et dispositif expérimental du stage. Les lignes de cercles verts représentent les rangs d'arbres (R), l'espace entre chaque rang d'arbres correspond à l'inter-rang (IR). Les répétitions de la modalité azotée sont colorées en orangé et les répétitions de la modalité carencée sont en blanc. Les modalités en gris n'ont pas été étudiées dans ce travail.

4.4 Dynamique de dégradation de la matière organique

4.4.1 Ressources disponibles pour l'activité biologique du sol : mesure des teneurs en carbone et azote total.

Afin de connaître la quantité de ressources naturellement disponibles dans les sols étudiés, qui sont les supports de l'activité biologique, la mesure des teneurs en carbone total et azote total a été effectuée. La teneur en carbone et azote a été obtenue par voie sèche selon la méthode décrite par la norme NF ISO 10694 (ISO 1995) à l'aide d'un analyseur Flash EA 112 Séries de l'entreprise ThermoElectro France.

Les échantillons utilisés pour ces mesures proviennent des échantillons composites également utilisés pour la mesure de respiration en condition contrôlée. Pour chaque modalité, la mesure de teneur en carbone et en azote a été répétée 3 fois, 33 échantillons ont donc été analysés au total.

Le carbone total mesuré de cette façon comprend à la fois le carbone organique et les carbonates. Comme il ne s'agit pas de sols calcaires, et en raison de l'absence de carbonates, les teneurs en carbone total mesurées sont considérées comme les teneurs en carbone organique du sol. De même, En revanche les teneurs en azote total comprennent à la fois l'azote minéral et l'azote organique présent dans le sol. Cependant les teneurs en azote minéral du sol mesurées lors des dosages sont inférieures à 0,002 %. On considère donc ici que l'azote total mesuré représente l'azote organique du sol.

4.4.2 Respiration basale (Bas) et induite (SIR) du sol en conditions contrôlées : MicroResp ©

Afin d'évaluer l'activité respiratoire potentielle des sols étudiés et la biomasse microbienne active, une mesure de la respiration basale et de la respiration induite par le glucose a été faite à l'aide du kit MicroResp © établi par (Campbell et al. 2003).

Ce kit est constitué de plaques garnies de puits, dans lesquels est placée une gélose colorée. Sur une autre plaque, chaque échantillon de sol est mis en contact avec un substrat carboné susceptible d'être utilisé par les micro-organismes du sol tel que le glucose. La plaque contenant le mélange sol-substrat est scellée avec la plaque de gélose et le tout est placé à incubation 4h (Figure 7). Le dégagement de CO₂ dû à la respiration des micro-organismes réagit avec le colorant de la gélose qui passe du magenta au jaune. Un appareil lit ensuite par colorimétrie la concentration en CO₂ dans les puits. Cette mesure permet donc d'évaluer l'utilisation de la matière organique par les organismes du sol selon les modalités étudiées (distance à l'arbre, apport d'azote, couverture du sol) à travers l'activité respiratoire de base, où aucun substrat n'est ajouté au sol. Il permet d'étudier aussi la respiration induite par le glucose, composé facilement utilisable par l'ensemble des communautés microbiennes. La respiration induite donne une indication sur la taille de la population microbienne active

Pour réaliser cette mesure, 11 échantillons composites ont été constitués. Sur le verger-maraîcher, 3 sous-échantillons ont été prélevés à la tarière sur 0-10cm de profondeur pour chaque rang et bande maraîchère, dans les trois répétitions puis ils ont été mélangés pour former un échantillon par rang. ou par bande, soit 7 échantillons composites. Pour le verger INRAE, 4 échantillons ont été constitués selon les modalités N_R, N_IR, SansN_R et SansN_IR. Pour chaque modalité, 3 sous-échantillons ont été prélevés à la tarière sur 0-10cm, dans 3 micro-parcelles différentes puis mélangés ensemble.



Figure 7: Kit MicroResp. La gélose colorée se situe dans la plaque du haut, scellée à l'aide d'un joint à la plaque des micro-puits contenant les échantillons de sol et le substrat

4.4.3 Respiration du sol *in situ* : mesure des flux de CO₂

Les flux de CO₂ émis par le sol proviennent principalement de la respiration des êtres vivants du sol, autotrophe pour les racines des plantes et hétérotrophe pour la macro, méso et microfaune du sol (Butterbach-Bahl et al. 2016). Cette respiration est témoin de leur activité d'utilisation du carbone organique du sol, donc de la dégradation de la matière organique. Mesurer l'intensité des flux de CO₂ émis par le sol permet donc d'évaluer indirectement l'intensité de l'activité de dégradation de la MO du sol.

Pour cela, des mesures ont été effectuées 2 à 3 fois par mois dans le verger-maraîcher et deux fois par mois dans le verger INRAE ; à l'aide d'un appareil, le C-flux-1, commercialisé par la société PP systems. Il est constitué d'une chambre de mesure et d'un boîtier d'enregistrement des données (figure 8). Les flux étaient mesurés à partir de 9h du matin jusqu'à 13h dans le verger INRAE et jusqu'à 16h30 dans le verger-maraîcher. Cette plage de mesure a permis d'avoir le minimum et le maximum des flux émis au cours de la journée. La différence de plage horaire entre les 2 parcelles s'explique par le fait que l'ombre est différenciée sur les bandes maraîchères, le maximum était atteint plus tard sur certaines planches, ce qui obligeait à faire des mesures plus longtemps. Le C-flux effectue une mesure de flux durant 5 minutes toutes les 15 minutes.

Deux appareils étaient disponibles pour la campagne de mesure. Sur le verger-maraîcher, l'un des deux restait sur la planche maraîchère centrale, tandis que le second était déplacé toutes les 15 minutes entre les 4 autres bandes afin d'obtenir les flux des 5 modalités pour une même journée. Les flux ont été mesurés 4 fois sur les bandes maraîchères et une fois sur les rangs d'arbres du VM.

Sur le verger INRAE, les 2 C-flux restaient au même endroit tout au long de la journée de mesure, l'un sur le rang de pommiers, l'autre dans l'inter-rang afin d'obtenir les flux des 2 positions pour une même journée. Lors d'une journée de mesure sur cette parcelle, les flux étaient mesurées sur une seule micro-parcelle, correspondant soit à la modalité azotée, soit à la modalité carencée. Au total, deux journées de mesure ont été effectuées sur chaque modalité.

Pour la présentation des résultats, le terme échantillon est utilisé pour désigner une journée de mesure sur une modalité. Lors d'une journée de mesure sur les bandes maraîchères du verger-maraîcher, 5 échantillons étaient donc obtenus et 2 échantillons étaient obtenus par journée de mesure pour le verger INRAE. Il est ainsi possible de calculer un flux moyen par échantillon afin de comparer les modalités entre elles.

4.5 Cycle de l'azote dans le sol : mesure de minéralisation de l'azote *in situ*

La minéralisation de l'azote dépend des micro-organismes du sol. Il existe différentes méthodes pour caractériser ce processus, mais elles peuvent être complexes et coûteuses à mettre en place. (Raison et al. 1987) présentent une méthode de mesure *in situ* qui a été utilisée dans le cadre de cette étude et qui permet d'évaluer de façon précise les phénomènes qui se déroulent réellement dans la parcelle.

Cette mesure consiste à placer une colonne de sol non remanié dans un tube en PVC de 8cm de diamètre et de 15cm de hauteur. Le tube est fermé en bas par du géotextile pour éviter la pénétration des racines et fermé en haut par un couvercle pour éviter le lessivage de l'azote par l'eau de pluie. Des trous sont percés en haut du tube afin que l'atmosphère dans le tube soit similaire à l'atmosphère extérieure (Figure 9). Le tube avec l'échantillon de sol est placé dans le sol durant 30 jours environ. L'azote minéral (NH₄⁺ et NO₃⁻) est extrait au moment de la mise en place et à la fin des 30 jours puis dosé afin de calculer le taux de



Figure 8: Analyseur C-flux en cours de mesure. La chambre de mesure (partie ronde) est abaissée



Figure 9: Tube de mesure de la vitesse de minéralisation de l'azote in situ

minéralisation de l'azote du sol. Cette mesure est répétée tous les mois sur les deux parcelles à partir du mois de mai.

Sur la parcelle VM, les tubes ont été placés dans les trois blocs, sur les cinq bandes maraîchères (figure 5). Elles n'ont pas été placées sur le rang d'arbre car il n'est pas irrigué, ce qui provoquerait des valeurs de minéralisation très faibles, de plus, la configuration des arbres et le type de sol font que la mise en place des tubes est très difficile sur cette zone. Sur le verger INRAE, les tubes ont été placés dans 8 blocs, pour chaque bloc, un tube était placé sur le rang et un dans l'inter-rang (figure 6).

La valeur de minéralisation nette (N_{min}) s'obtient à partir des valeurs de nitrification ($\Delta N-NO_3^-$) et d'ammonification ($\Delta N-NH_4^+$). La vitesse de minéralisation se calcule en faisant la différence entre les teneurs finales et les teneurs initiales de la somme de de nitrate et d'ammonium dans le sol et en divisant cette valeur par le nombre de jours d'incubation dans le sol. Une valeur négative de N_{min} indique que l'organisation de l'azote par les micro-organismes du sol a été le processus dominant, l'azote présent ayant été majoritairement prélevé pour leur propre fonctionnement métabolique. Une valeur positive indique en revanche qu'il y a eu majoritairement de la minéralisation de l'azote organique, les organismes du sol ont décomposé les molécules organiques complexes en molécules d'azote minéral libéré dans le sol et disponible pour les plantes et les autres organismes.

4.6 Fragmentation de la litière

4.6.1 Tea Bag Index

(Keuskamp et al. 2013) ont établi une méthode peu coûteuse et facilement réalisable pour générer des données sur les taux de décomposition et de stabilisation de la litière du sol en utilisant des sachets de thé. En utilisant deux types de thé différents, on peut obtenir une courbe de décomposition en une seule mesure dans le temps, le Tea Bag index est constitué de deux paramètres : le taux de décomposition k de la litière et le taux de stabilisation S . L'intérêt de cette méthode est de pouvoir générer des données sur un maximum de types de sol différents à travers le monde.

Le protocole consiste à enterrer à 8 cm de profondeur un sachet de thé vert et un sachet de rooibos, durant 90 jours. La masse de thé est pesée avant la mise en terre et après afin de calculer la perte de matière organique qui permet ensuite de calculer les coefficients k et S . Ce protocole a été mis en place sur les deux parcelles d'étude. Sur la parcelle de verger-maraîcher, 21 points d'échantillonnage ont été choisis sur lesquels on place trois répétitions, soit 3 sachets de thé vert et 3 sachets de rooibos. Les points sont situés sur chaque rang d'arbre et chaque bande maraîchère, chacun divisé en 3 blocs (Figure 5). Sur la parcelle de l'INRAE, les 12 blocs sont utilisés pour cette mesure. Il y a 36 points d'échantillonnage avec 3 répétitions à chaque fois, comme dans le verger-maraîcher (Figure 6).

En raison du temps d'incubation en pleine terre, les résultats de cette mesure ne seront pas présentés dans ce rapport.

4.7 Traitement des données et analyse statistique

Les données ont été traitées et analysées à l'aide du logiciel Rstudio (Version 1.4.1103 2009-2021).

Les études statistiques ont étudié l'effet des facteurs distance à l'arbre, modalités d'apport d'azote et position dans le verger sur les différentes variables. Pour cela, le test ANOVA a été utilisé lorsque les conditions d'application étaient remplies (normalité des résidus et homoscedasticité des variances). Si le résultat du test indiquait un effet significatif du facteur sur la variable, un test post-hoc (Tukey HSD) était effectué pour différencier les modalités. Lorsque les conditions

d'applications de l'ANOVA n'étaient pas remplies, le test de Kruskal-Wallis a été utilisé, suivi d'un test de comparaison par paires (Wilcoxon) lorsqu'il y avait un effet significatif du facteur sur la variable étudiée.

Les facteurs et modalités étudiées pour les différentes variables sont la distance à l'arbre avec 7 ou 5 modalités sur le verger maraîcher (2 rangs + 5 bandes maraîchères ou seulement les 5 bandes maraîchères selon les mesures), les modalités d'apport d'azote : avec apport normal (N) ou carencé en azote (SansN) et enfin la position dans le verger qui correspond à un type de couverture du sol, sur le rang (R), le sol est nu, sur l'inter-rang (IR), le sol est couvert par un enherbement permanent.

Pour les données de respiration *in situ* une analyse en composante principale a été réalisée.

Enfin des graphiques ont été tracés pour savoir s'il existe des liens entre les variables mesurées, notamment la respiration *in situ* et en conditions contrôlées.

Le tableau 2 récapitule la nomenclature utilisée pour désigner les modalités d'étude dans les deux parcelles

Le tableau 3 récapitule l'ensemble des mesures réalisées et les méthodes d'échantillonnage suivies, la figure 10 présente la chronologie des mesures tout au long du stage

Tableau 2: Nomenclature utilisée pour les modalités analysées

Parcelle	Modalité	Code
INRAE	Azotée : apport de matière organique au sol + fertilisation azotée foliaire	N
INRAE	Carencée en azote : fertilisation azotée foliaire seulement	SansN
INRAE	Rang d'arbres : sol nu, travaillé et irrigué	R
INRAE	Inter-rang : enherbement permanent	IR
INRAE	Rang de la modalité azotée	N_R
INRAE	Inter-rang de la modalité azotée	N_IR
INRAE	Rang de la modalité carencée en azote	SansN_R
INRAE	Inter-rang de la modalité carencée en azote	SansN_IR
VM	Rang d'arbres à l'Ouest	W
VM	Rang d'arbres à l'Est	E
VM	Côté Ouest de la parcelle : bande maraîchère la plus proche du rang d'arbres	B1W
VM	Côté Ouest de la parcelle : bande maraîchère la plus éloignée du rang d'arbres	B2W
VM	Côté Est de la parcelle : bande maraîchère la plus proche du rang d'arbres	B1E
VM	Côté Est de la parcelle : bande maraîchère la plus éloignée du rang d'arbres	B2E
VM	Bande témoin : bande maraîchère centrale, la plus éloignée des deux rangs d'arbres	C

Tableau 3: Tableau récapitulatif des mesures effectuées

Type de mesures	Fréquence	Nombre de répétitions
Tea bag Index	1 mesure durant 3 mois	3 répétitions par point de mesure. <ul style="list-style-type: none"> P05 INRAE : Deux points de mesure – rang (R) et inter-rang (IR) par micro-parcelle VM : 21 points de mesure (7 modalités*3 répétitions)
Tubes minéralisation	1 mesure par mois (incubation in situ 30 jours)	<ul style="list-style-type: none"> P05 INRAE : 4 répétitions de 4 modalités IR-N, IR, R-N, R VM : 3 répétitions de 5 modalités, pas de mesure sur les rangs d'arbres
C-flux	2 mesures par mois sur chaque parcelle	<ul style="list-style-type: none"> P05 INRAE : une mesure sur le rang et une sur l'inter-rang VM : Une mesure fixe bande centrale, Une mesure mobile 4 autres bandes
Micro-resp	1 mesure	<ul style="list-style-type: none"> P05 INRAE : 4 échantillons composites composés de 3 sous-échantillons IR-N, IR, R-N, R VM : 7 échantillons composites composés de 3 sous-échantillons
Dosage CN	1 mesure	<ul style="list-style-type: none"> P05 INRAE : 4 échantillons composites composés de 3 sous-échantillons IR-N, IR, R-N, R VM : 7 échantillons composites composés de 3 sous-échantillons

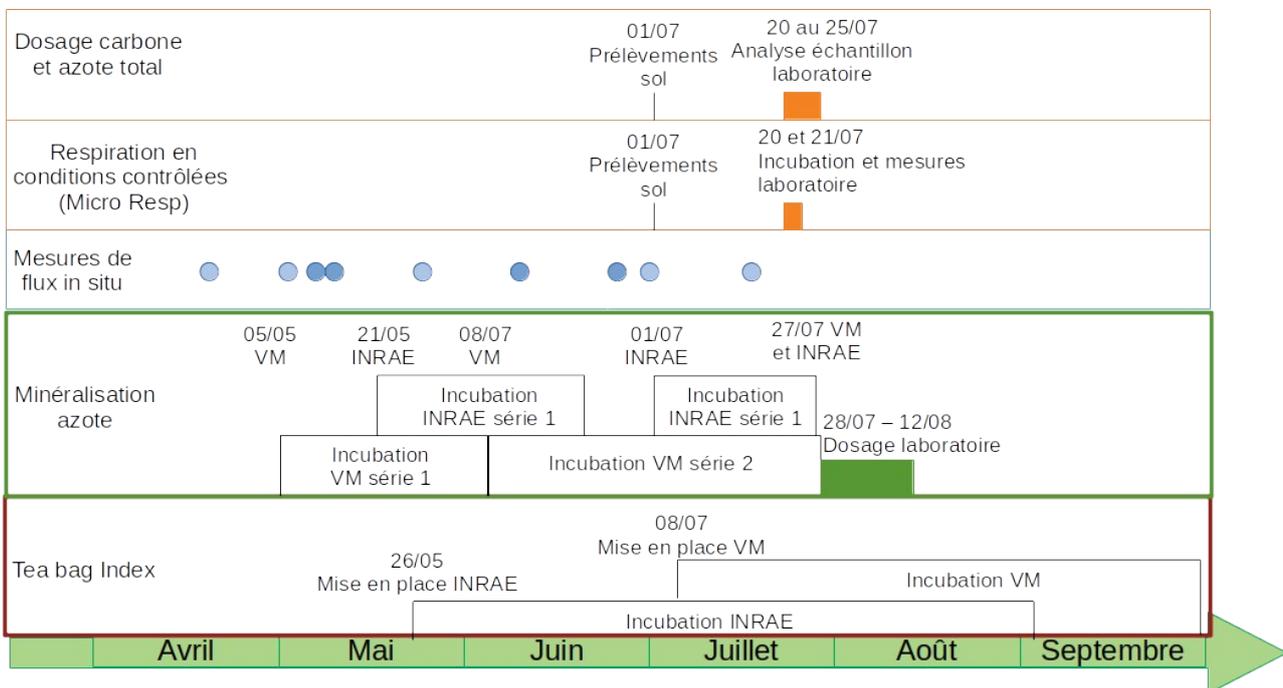


Figure 10: Frise récapitulative du déroulement des mesures durant le stage. Les mesures de C-flux au VM (cercles clairs) ont été effectués les 26/04, 03/05, 28/05, 30/06 et 15/07. Les mesures de C-flux au verger INRAE (cercles foncés) ont été effectués les 07/05, 10/05, 11/06 et 21/06

5 Résultats et interprétation

5.1 Dynamique de dégradation de la matière organique

5.1.1 Ressources disponibles pour l'activité biologique du sol : mesure des teneurs en carbone et azote total.

Les teneurs en carbone et en azote total pour les modalités des deux parcelles sont présentées en figures 11 et 12. Les analyses des teneurs ont été réalisées en séparant les données des deux parcelles. Les deux parcelles présentent des amplitudes de valeur similaires, entre 1,3 et 2,6%.

La teneur en carbone moyenne pour le verger INRAE est supérieure à la teneur moyenne du VM (2.0 et 1.8 respectivement) mais cette différence n'est pas significative (test de student, p-value = 0,06698).

La teneur en azote moyenne pour le verger INRAE est légèrement supérieure à la teneur moyenne du VM (0,1425 et 0,1414 respectivement) mais cette différence n'est pas significative (test de student, p-value = 0,897)

Les ratios moyens C/N pour le VM sont compris entre 12,3 et 13,3. Les ratios moyens supérieurs à l'INRAE par rapport au VM sont compris entre 12 et 15

Au sein de la parcelle VM, les deux rangs d'arbre présentent les teneurs en carbone les plus élevées (figure 11), significativement différentes des bandes maraîchères (p-value = $2,28 \cdot 10^{-9}$). Les bandes B1W et B1E ainsi que la bande témoin présentent des valeurs plus élevées que B2W et B2E, mais la différence n'est significative qu'entre B1W qui présente la teneur la plus élevée entre toutes les bandes et B2E qui présente la teneur la plus basse.

On peut donc considérer qu'il y a un effet de l'éloignement par rapport à l'arbre. On observe la même tendance pour la teneur en azote (figure 12) bien qu'il n'y ait qu'une différence faiblement significative entre la bande B1W et la bande témoin (p-value = 0.047). Ces deux planches présentent les plus faibles variabilités de valeurs ce qui peut expliquer le résultat du test.

Au sein de la parcelle INRAE, il n'y a pas de différence significative entre les modalités selon le test ANOVA (p-value = 0,0903). Toutefois, les tendances méritent d'être commentées. La modalité N_R présente une teneur moyenne en C plus élevée et les modalités N_IR et Sans N_R présentent les valeurs les plus basses. Sur le rang la teneur moyenne en carbone est plus élevée dans la modalité azotée que dans la modalité carencée, ce qui correspond aux apports de matière organique effectuées sur la modalité azotée que la modalité carencée ne reçoit pas. Sur l'inter-rang, on observe la tendance inverse (Figure 11).

Pour les teneurs en azote il n'y a pas de différence significative entre les modalités selon le test ANOVA (p-value = 0,0988). La modalité N_R présente les valeurs les plus hautes et la plus grande variabilité, comme pour la teneur en carbone et la modalité N_IR présente les valeurs les plus basses. Comme pour la teneur en carbone, la valeur moyenne sur le rang de la modalité azotée est plus élevée que celle de la modalité carencée, et c'est la tendance inverse pour l'inter-rang (Figure 12).

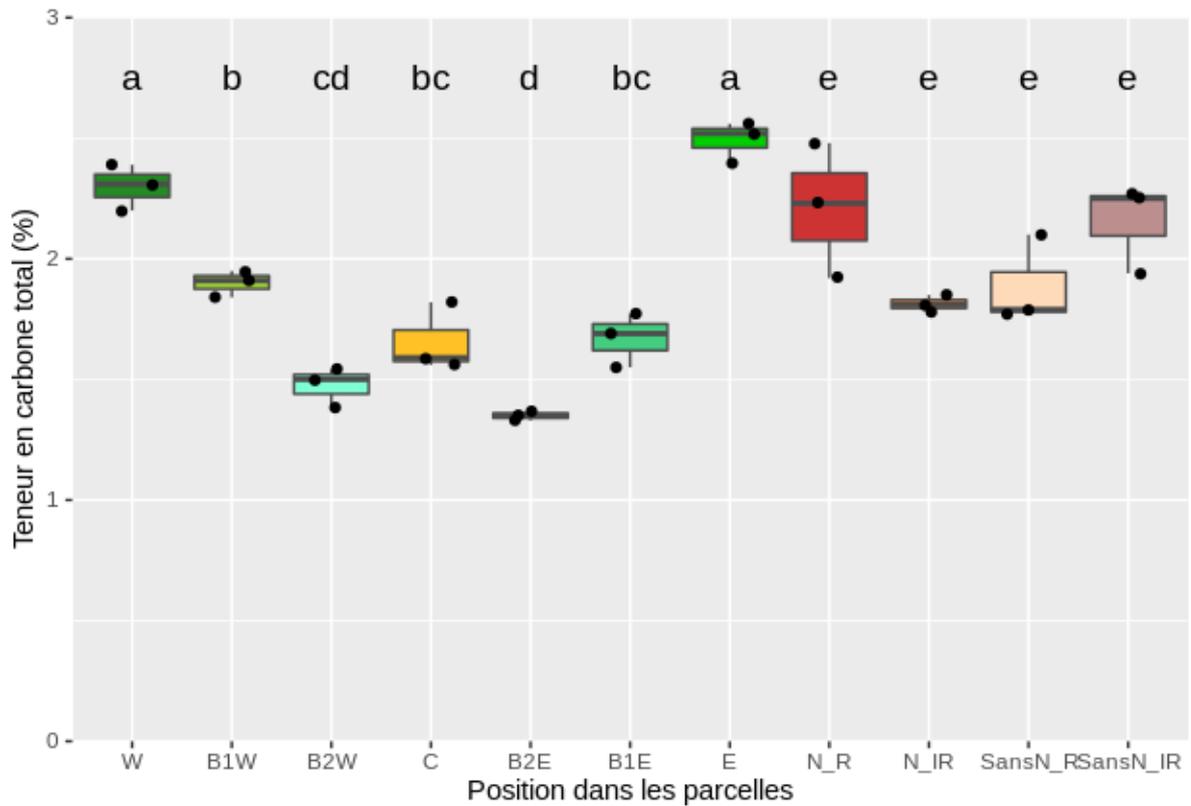


Figure 11: Teneur en carbone total dans les modalités du VM et du verger INRAE. Les tests statistiques ont été réalisés séparément pour les deux parcelles

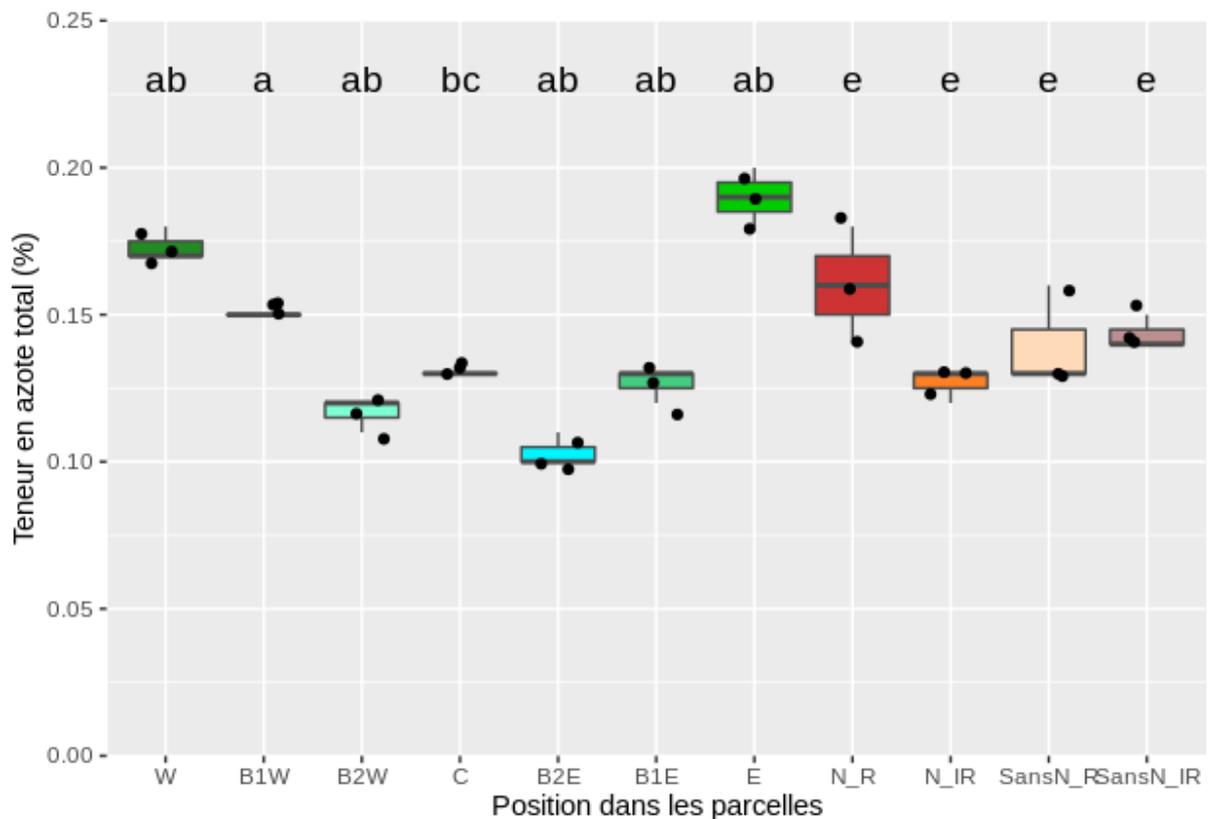


Figure 12: Teneur en azote total dans les modalités du VM et du verger INRAE. Les tests statistiques ont été réalisés séparément pour les deux parcelles

5.2 Respiration basale (Bas) et induite (SIR) du sol en conditions contrôlées : MicroResp ©

5.2.1 Parcelle Verger-Maraîcher

La figure 13 montre que la respiration basale est la plus importante dans le rang W et la bande B1E qui sont significativement différentes des autres modalités (p -value $< 2,2 \cdot 10^{-16}$). Ensuite, la respiration basale est élevée sur le rang E et B2W qui ne se distinguent pas l'une de l'autre mais sont significativement différentes des autres modalités. Enfin, la respiration basale est de moins en moins importante pour les modalités B1W, et B2E et C qui présentent les valeurs les plus basses. Ces trois dernières modalités sont significativement différentes les unes des autres. On observe ainsi deux tendances ; d'abord la respiration basale est plus importante sous les arbres et à proximité, ce qui est confirmé par le fait que la valeur moyenne la plus basse correspond à la planche la plus éloignée des deux rangs d'arbres (C). On observe également qu'il y a un gradient d'Ouest en Est pour les bandes maraîchères avec des valeurs plus élevées à l'Est, à l'inverse des rangs d'arbres pour lesquels la valeur moyenne est significativement plus élevée à l'Ouest.

En respiration induite par l'ajout de glucose (figure 14), les quantités de carbone émis sont effectivement plus importantes qu'en respiration basale pour toutes les modalités mais les tendances entre les deux types de respiration sont différentes. D'abord, les rangs d'arbres réagissent plus fortement à l'induction par le glucose (ratio SIR/Bas de 4,64 et 3,26 pour W et E respectivement 4) avec une respiration significativement plus élevée, que sur les planches maraîchères (p -value $< 2,2 \cdot 10^{-16}$). On retrouve une valeur moyenne significativement plus élevée sur le rang W que sur E. Ensuite la respiration est toujours significativement plus importante sur B1E que sur les autres bandes maraîchères. B1W, B2W et C présentent des valeurs basses, sans différence significative entre elles et B2E présente la valeur moyenne la plus basse significativement. La population microbienne active semble donc être plus importante sous les arbres, ce qui se traduit par une respiration basale et induite plus importante sur ces rangs, la bande B1E se distingue également des autres bandes maraîchères avec une biomasse microbienne active plus importante. Il est d'ailleurs à noter que sans ajout de glucose, la respiration est plus importante sur B1E que sur E, et qu'il se produit l'inverse en respiration induite. La communauté microbienne active est donc plus importante sur E mais sans ajout de glucose, d'autres facteurs doivent donc influencer l'activité de respiration pour cette parcelle. Sans compter les rangs de pommiers, le ratio SIR/Bas est plus important sur B1E (2,43) qui se distingue significativement des autres planches, comme en respiration basale. En comparaison, les autres planches maraîchères sont moins influencées par le glucose (ratios SIR/Bas compris entre 1,37 et 1,95). Par ailleurs en respiration induite, la planche C ne présente pas la valeur la plus faible, la communauté microbienne active est donc plus importante que sur B2E.

Tableau 4: Ratios de respiration induite/respiration basale (SIR/Bas)

Modalité	Ratio SIR/Bas
W	4,64
B1W	1,54
B2W	1,38
C	1,95
B2E	1,37
B1E	2,43
E	3,26

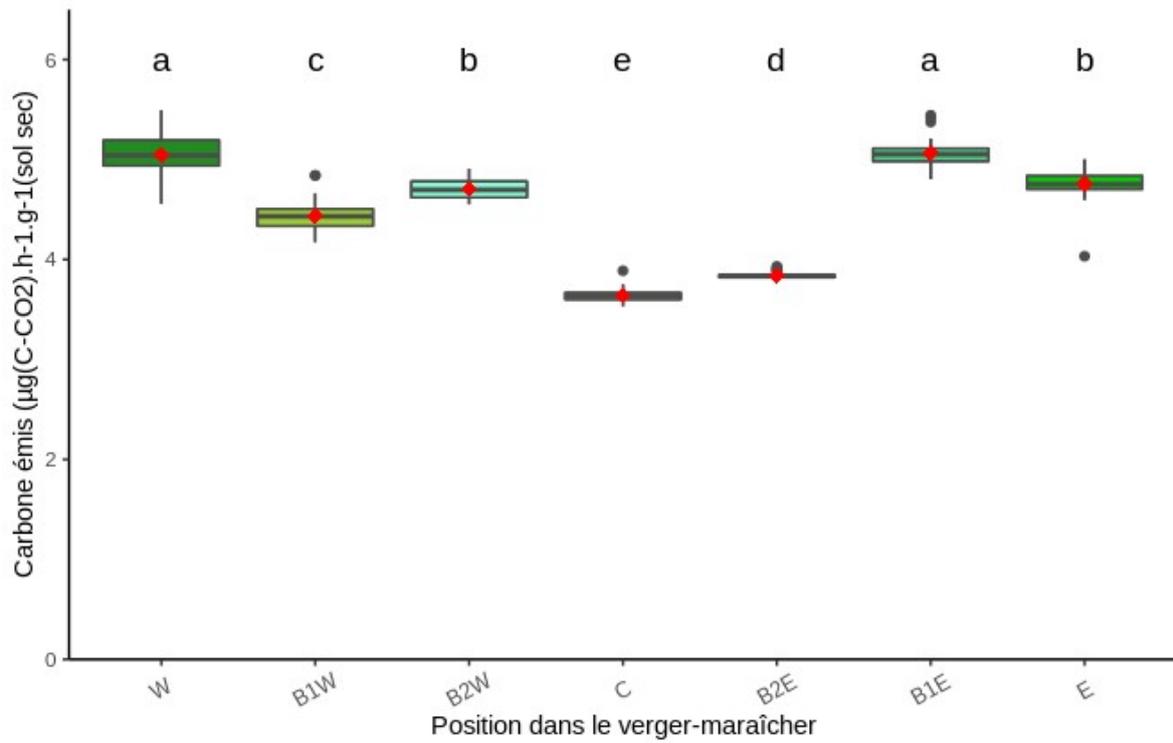


Figure 13: Carbone émis par respiration basale dans le verger-maraîcher (n=48)

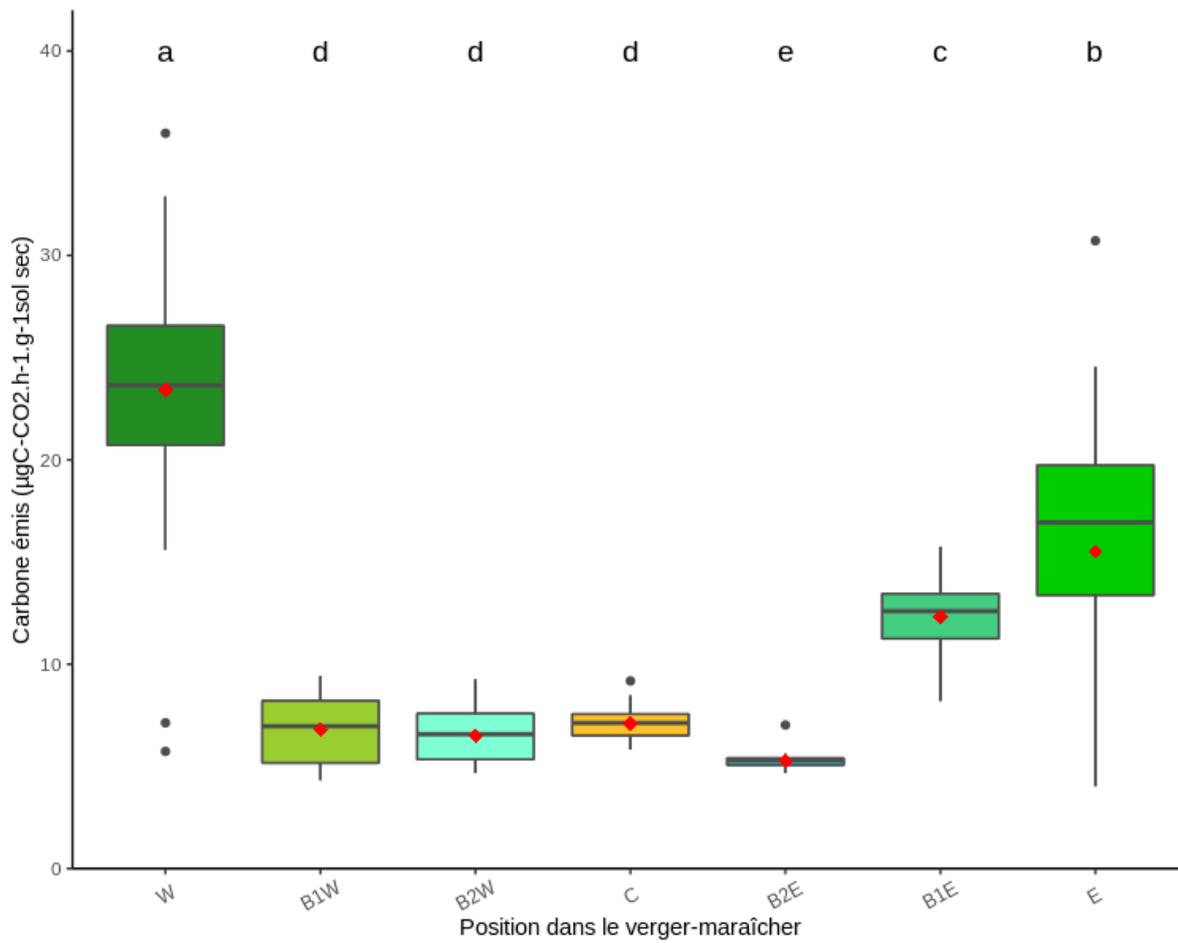


Figure 14: Carbone émis par respiration induite dans le verger-maraîcher (n=48)

Ainsi, sur le verger-maraîcher, les rangs d'arbres présentent la biomasse microbienne active et la respiration basale la plus importante. En conditions idéales de température et d'humidité, l'activité respiratoire sur ces planches est donc cohérente avec la taille de la population. Pour les deux types de respiration, le rang Ouest présente des valeurs significativement plus élevées que le rang Est. On observe ensuite un effet de distance à l'arbre avec des valeurs plus basses sur les bandes maraîchères, en particulier sur la bande témoin pour les deux types de respiration. Cependant la taille des populations actives sur les planches ne se traduit pas de la même façon en respiration basale. La planche B1E se différencie significativement des autres planches, en respiration basale comme induite. La modalité témoin (C) présente la respiration basale la plus faible mais ce n'est pas le cas en respiration induite.

5.2.2 Parcelle INRAE

En respiration basale (Figure 15), on observe une différence significative entre les modalités azotée et carencée ($p\text{-value} < 2,2 \cdot 10^{-16}$). Sur le rang, la respiration basale est significativement supérieure dans la modalité azotée. Sur l'inter-rang, c'est l'inverse, la modalité carencée présente une respiration basale moyenne supérieure à la modalité azotée. De plus, SansN_IR présente une valeur de respiration moyenne significativement supérieure à toutes les autres modalités ($5,209 \mu\text{g}(\text{C}-\text{CO}_2) \cdot \text{h}^{-1} \cdot \text{g}^{-1}(\text{sol sec})$). Ainsi, dans la modalité carencée il y a une différence significative entre rang et inter-rang mais ce n'est pas le cas dans la modalité azotée.

Pour la respiration induite (Figure 16), toutes les modalités sont significativement différentes les unes des autres ($p\text{-value} < 2,2 \cdot 10^{-16}$). La modalité SansN_IR présente toujours la respiration moyenne la plus élevée significativement et c'est celle qui est le plus influencée par le glucose (ratio SIR/bas : 2,99, tableau 5). Sur les rangs d'arbres, on observe l'inverse de ce qu'il se passe en respiration basale : la respiration est plus forte dans la modalité carencée (SansN_R) que dans la modalité azotée (N_R). De plus N_R est la modalité la moins influencée par le glucose (Ratio : 1,98). Ensuite, pour les deux modalités d'apport d'azote, la respiration induite est significativement plus élevée dans l'inter-rang que dans le rang alors que cette tendance n'était pas visible en respiration basale. Il est donc probable que la communauté microbienne active soit plus importante sur le rang de la modalité carencée que sur le rang de la modalité azotée mais que la carence en matière organique limite la respiration basale.

En comparant les 2 parcelles, les valeurs de respiration basale sont significativement plus élevées pour la parcelle INRAE que pour la parcelle VM ($p\text{-value} = 6.111\text{e-}10$). Les valeurs moyennes sont respectivement de 4.8 ± 0.3 et de $4.5 \pm 0.5 \mu\text{gC}-\text{CO}_2 \cdot \text{h}^{-1} \cdot \text{g}^{-1} \text{sol sec}$, respectivement. Pour la respiration induite, les valeurs de la parcelle INRAE sont significativement supérieures à celles de la parcelle VM ($p\text{-value} = 3.36\text{e-}10$). On n'observe pas les mêmes tendances entre modalités pour les deux types de respiration.

Tableau 5: Ratios SIR/Bas

Modalité	SIR/Bas
N_R	1,98
N_IR	2,68
Sans N_R	2,38
Sans N_IR	2,99

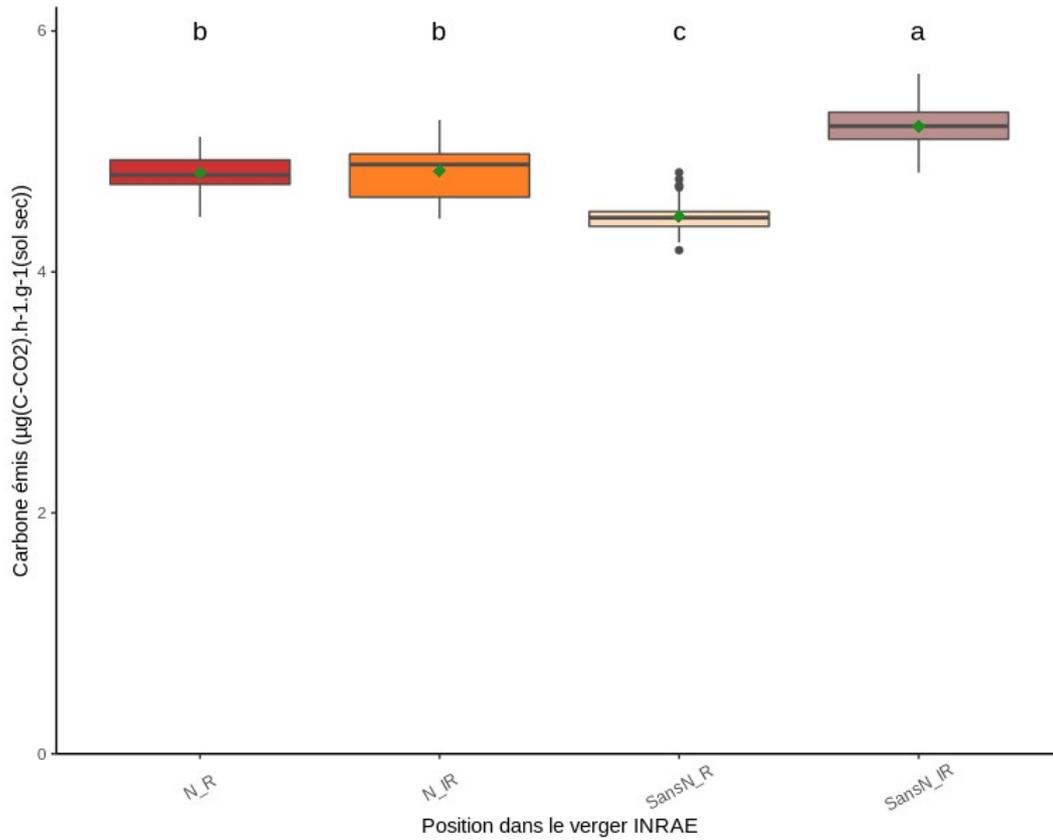


Figure 15: Carbone émis par respiration basale dans le verger INRAE (n=48)

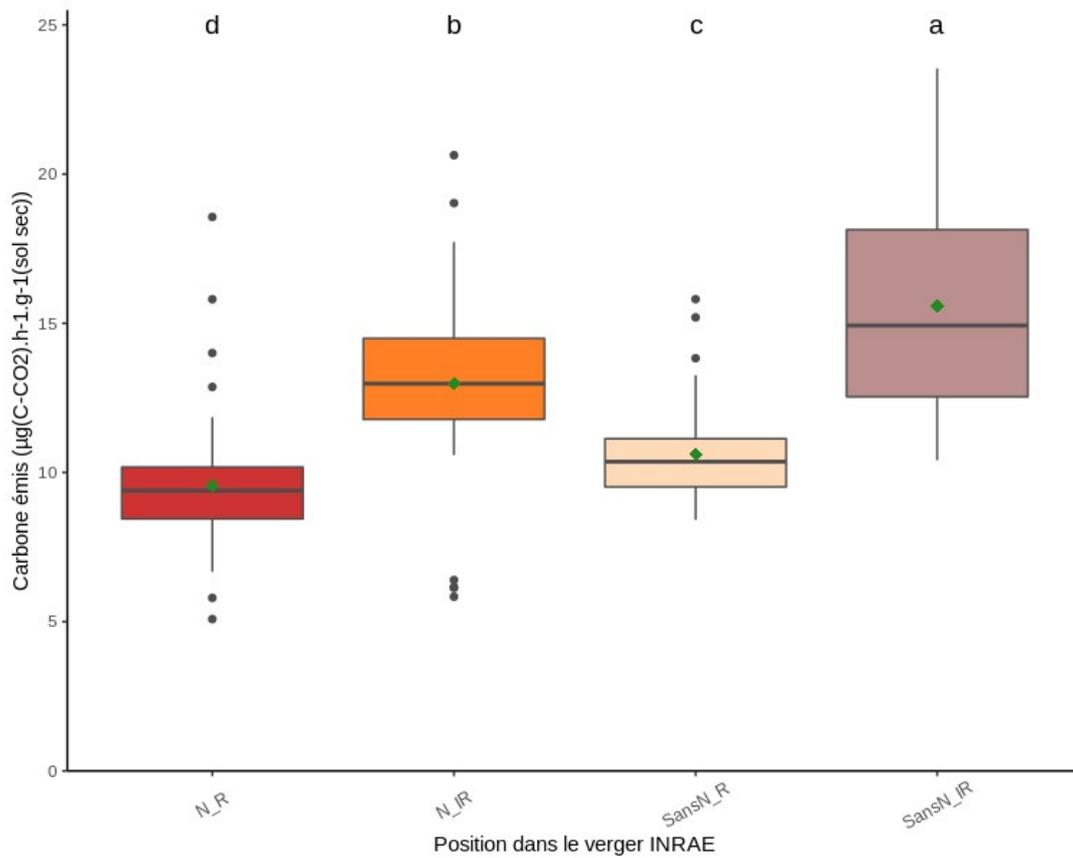


Figure 16: Carbone émis par respiration induite dans le verger INRAE (n=48)

5.3 Respiration du sol *in situ* : mesure des flux de CO₂

5.3.1 Comparaison des flux moyens journaliers

La figure 17 montre deux exemples d'évolution journalière du flux de CO₂. Elle illustre le fait que l'évolution du flux n'est pas la même selon les modalités. La modalité C présente une évolution régulière au cours de la journée avec une amplitude importante entre le flux minimal en début de journée et le flux maximal en fin de journée. Sur la modalité SansN_R, le flux n'évolue pas au cours de la journée, il se maintient à des valeurs basses.

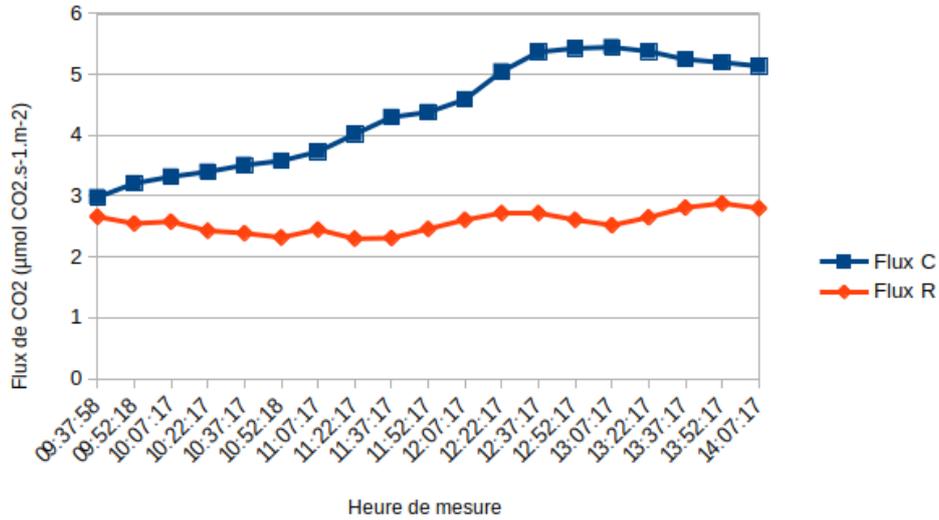


Figure 17: Evolution du flux de CO₂ sur la bande témoin (C) du VM le 26 avril (bleu) et sur le rang de pommiers carencé en azote (SansN_R) du verger INRAE le 7 mai 2021 (orange).

Pour savoir si les flux de CO₂ sont influencés par les modalités d'étude, les flux moyens journaliers ont été comparés (figures 18 et 19) Le test n'a pas montré de différence significative entre les modalités (Kruskal-Wallis, p-value = 0.1685).

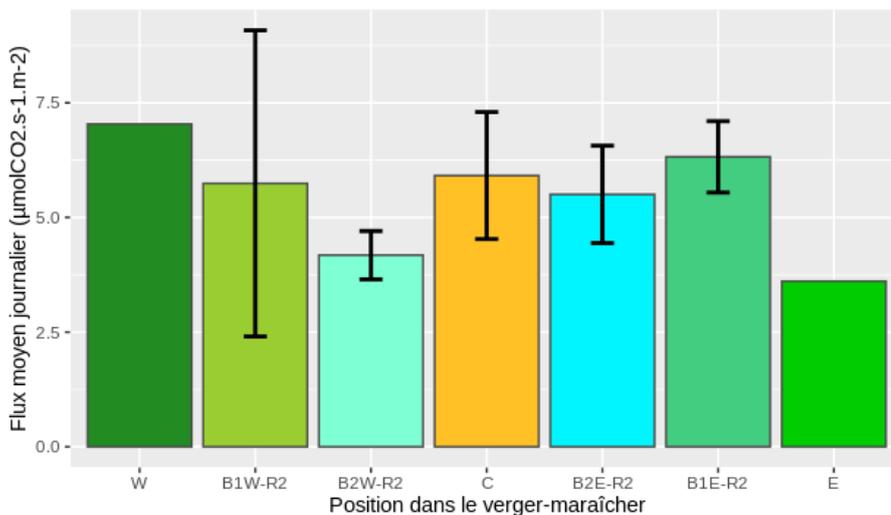


Figure 18: Comparaison des flux moyens journaliers entre les modalités du VM ($n_{bandes} = 4$, $n_{rangs} = 1$)

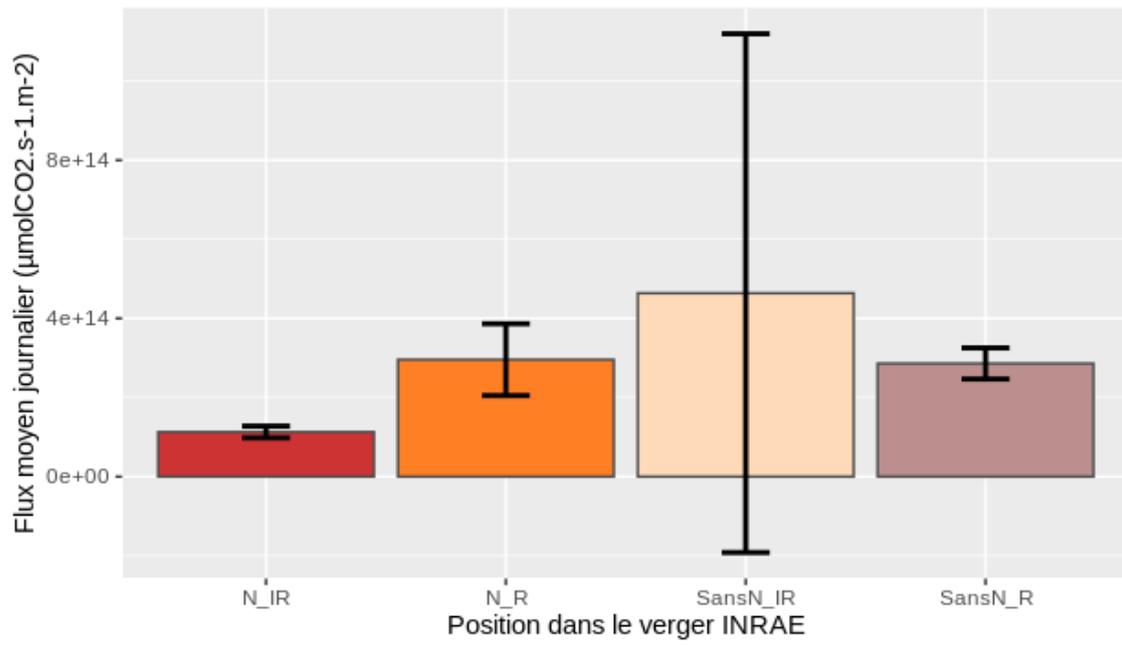


Figure 19: Comparaison des flux moyens journaliers entre les modalités du verger INRAE (n=2)

5.3.2 Analyse en composante principale (ACP) sur les données des deux parcelles

Afin de réaliser une étude plus fine pour tenter de différencier les modalités d'études, il a été décidé de ne pas se concentrer seulement sur le flux moyen journalier mais d'étudier également l'allure des courbes de flux. Une analyse en composantes principales (ACP) a été réalisée sur 6 variables de flux présentés dans le tableau 6.

Tableau 6: Variables de flux utilisées pour réaliser l'analyse en composantes principales (ACP)

Variable	Définition
FluxMax	la valeur maximale de flux de CO ₂ mesurée par journée de mesure et par modalité
AmpFlux	Amplitude du flux, soit l'écart entre les valeurs minimale et maximale de flux pour chaque échantillon
AcroiMax	Accroissement maximum, soit la plus forte pente entre deux points d'une courbe de flux
DurFluxMinMax	Durée écoulée en minutes entre la valeur minimale et la valeur maximale de flux
TimeFluxMax	Durée écoulée en minute entre la première mesure de flux et la mesure de flux maximum
FluxMoy	Valeur moyenne de flux par modalité et par session de mesure

Ces variables sont liées aux flux journaliers et les caractérisent. L'ACP permet de déterminer quelles variables décrivent le mieux les différences entre les flux selon les modalités étudiées. La distinction entre modalités se fait selon deux axes (ou deux dimensions). Ces dimensions sont présentées sur le cercle des corrélations (figure 20). Elles sont définies par une ou plusieurs des 6 variables du tableau. présente les variables qui contribuent le plus à expliquer les différences entre modalités.

Les variables de température représentées en bleu ont été intégrées au modèle ACP afin de savoir si elles influençaient les flux journaliers mais elles sont apparues comme peu influentes c'est pourquoi elles n'ont pas été détaillées.

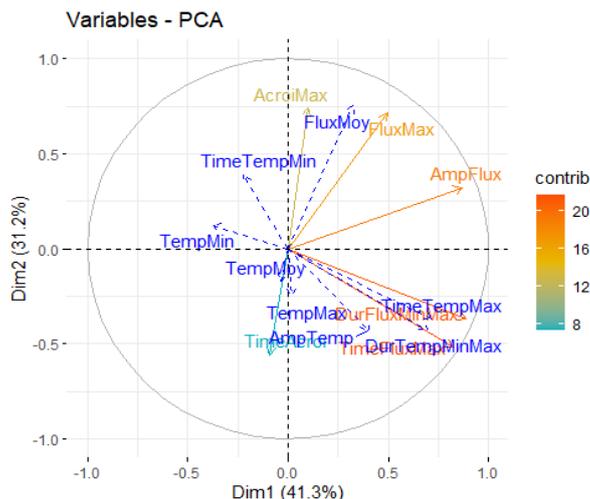


Figure 20: Contributions des variables pour l'ACP. Données INRAE et verger-maraîcher confondus

La première dimension est fortement liée aux variables AmpFlux, DurFluxMinMax et TimeFluxMax. Les échantillons situés à droite du plan factoriel (Figure 21) correspondent donc à des courbes d'émission où le flux évolue lentement et où le flux maximum est atteint le plus tard dans la journée et présente une différence importante entre le flux minimal et maximal (amplitude). La seconde dimension est fortement liée à la variable FluxMax : les échantillons situés en haut du 1^{er} plan factoriel correspondent donc à des courbes journalières d'émission avec de fortes valeurs de flux maximum. Ces courbes pourront aussi présenter des pentes fortes entre les différentes heures de mesure, compte tenu de la contribution de la variable AccroiMax.

Pour illustrer l'identification de ces deux dimensions, quelques courbes de flux des points extrêmes ont été tracées. La figure 21 présente les positions des échantillons les uns par rapport aux autres selon les deux dimensions du modèle ACP. La figure 22 présente les courbes des échantillons choisis pour illustrer ces dimensions.

Les échantillons choisis pour tracer les courbes sont les échantillons 1, 5, 9, 26, 27 et 28 car ils sont positionnés comme des valeurs extrêmes, ce qui veut dire qu'ils contribuent fortement à la définition du modèle. Si l'on suit la définition des axes 1 et 2 de l'ACP, on peut caractériser les courbes du graphique 22.

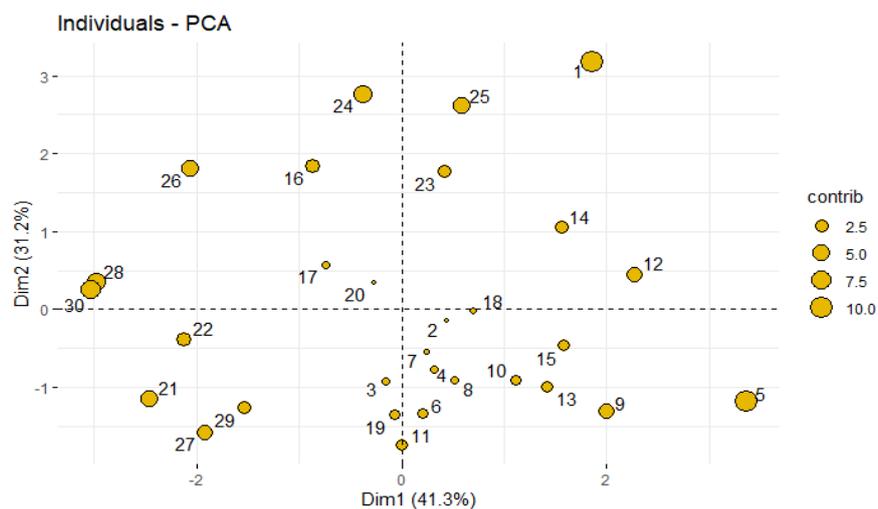


Figure 21: Position des échantillons les uns par rapport aux autres selon les dimensions 1 et 2 de l'ACP

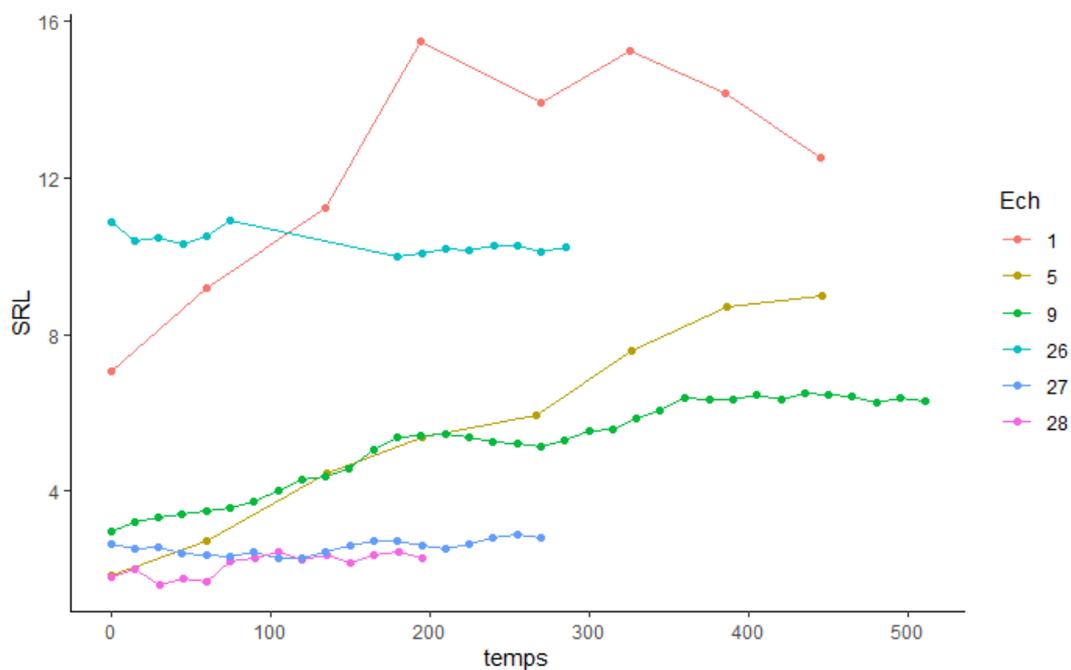


Figure 22: Courbes de flux de CO₂ de 6 échantillons.

Les numéros correspondent respectivement aux échantillons suivants :

1 : B1W le 26-04 ; 5 : B2W le 26-04 ; 9 : planche C le 26-04 ; 26 : N_IR le 25-06 ;
27 : Sans N_R le 07-05 ; 28 : N_R le 10-05.

L'échantillon 1 représente la mesure sur la planche B1W du verger-maraîcher effectuée le 26 avril. Il est placé très haut en ordonnée sur le plan factoriel, ce qui correspond à un flux avec des variations fortes et des valeurs élevées et c'est bien ce que l'on observe sur la courbe qui présente le flux le plus important avec une augmentation rapide des valeurs comparé aux autres flux. Par rapport à la dimension 1 de l'ACP, il correspond à un flux qui évolue à une vitesse intermédiaire.

Les échantillons 5 et 9 correspondent respectivement aux planches B2W et C lors des mesures du 26 avril. Pour ces deux échantillons on observe un flux qui évolue de façon régulière tout au long de la journée, sans variation importante entre deux moments de mesure. Il a donc une valeur élevée selon l'axe 1 de l'ACP et une valeur basse selon l'axe 2, malgré le fait que le flux atteint des valeurs élevées en fin de journée.

Les courbes 26, 27 et 28 correspondent à des flux qui évoluent peu entre le début et la fin de la mesure, la valeur maximale est atteinte très tôt, c'est pourquoi les échantillons sont placés très à gauche sur le plan factoriel. Ils correspondent respectivement aux mesures effectuées sur l'inter-rang de la modalité azotée (N_IR) le 25 juin, au rang de la modalité carencée (SansN_R) le 7 mai et au rang de la modalité azotée (N_R) le 10 mai. Malgré la faible évolution du flux et la valeur de flux max faible, les échantillons 26 et 28 présentent des variations avec des pentes importantes, c'est pourquoi elles sont placées respectivement haut et au 0 de l'axe 2. L'échantillon 27 présente des pentes presque nulles tout au long de la mesure, c'est pourquoi il est placé très bas par rapport à l'axe 2.

Suite à l'identification des variables qui expliquent le plus les différences entre les points de mesure, on cherche à identifier les modalités qui se différencient selon ces variables.

Comparaison des parcelles

Les deux parcelles se distinguent surtout selon l'axe 1, avec les valeurs du verger-maraîcher plutôt centrée ou à droite alors que celles de l'INRAE se situent à gauche (Figure 23). Sur le verger-maraîcher, les flux augmentent donc plus lentement au cours de la journée que sur le verger INRAE et les différences entre flux max et flux min sont plus importantes pour le VM. Sur le verger INRAE, le flux maximal est atteint plus rapidement, bien qu'il y ait une forte variabilité au sein de cette parcelle.

Les flux de l'INRAE peuvent présenter des fluctuations rapides et des valeurs de flux maximal élevées c'est pourquoi les points sont placés un peu plus haut selon l'axe 2 que pour le verger-maraîcher.

Comparaison de la position dans le verger

La modalité R correspond aux rangs d'arbres des deux parcelles et la modalité IR comprend les inter-rangs de la parcelle INRAE et toutes les bandes maraîchères du VM.

La distinction entre ces deux groupes se fait selon l'axe 1 (Figure 24). Pour les deux parcelles, sur les rangs d'arbres le flux évolue peu au cours de la journée : l'amplitude est faible et la valeur maximale est atteinte tôt à partir du début des mesures. Cela correspond bien aux observations faites sur les courbes des rangs d'arbres, en particulier à l'INRAE où on n'observe pas ou peu d'évolution au cours de la journée avec des valeurs qui restent basses. Pour la modalité inter-rang qui comprend ici des situations différentes (inter-rang INRAE et bandes maraîchères VM), les flux se distinguent des rangs d'arbre par l'amplitude des valeurs et le fait que les flux évoluent plus lentement au cours de la journée. Les modalités Rang et Inter-rang ne se distinguent pas selon l'axe 2.

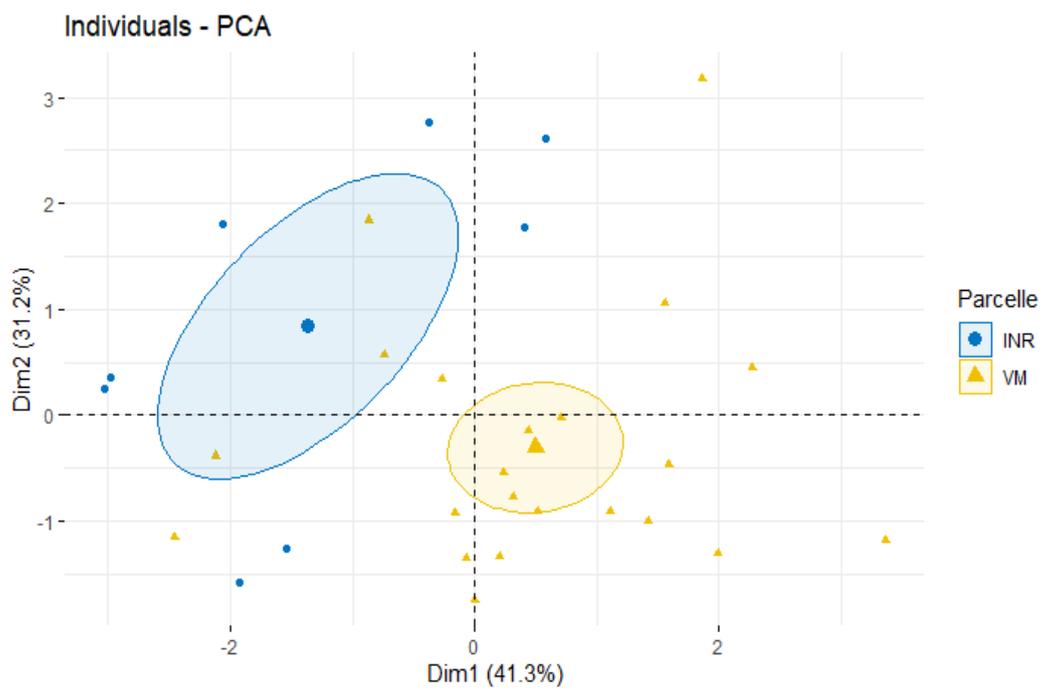


Figure 23: Étude du facteur parcelle selon les dimensions 1 et 2 de l'ACP

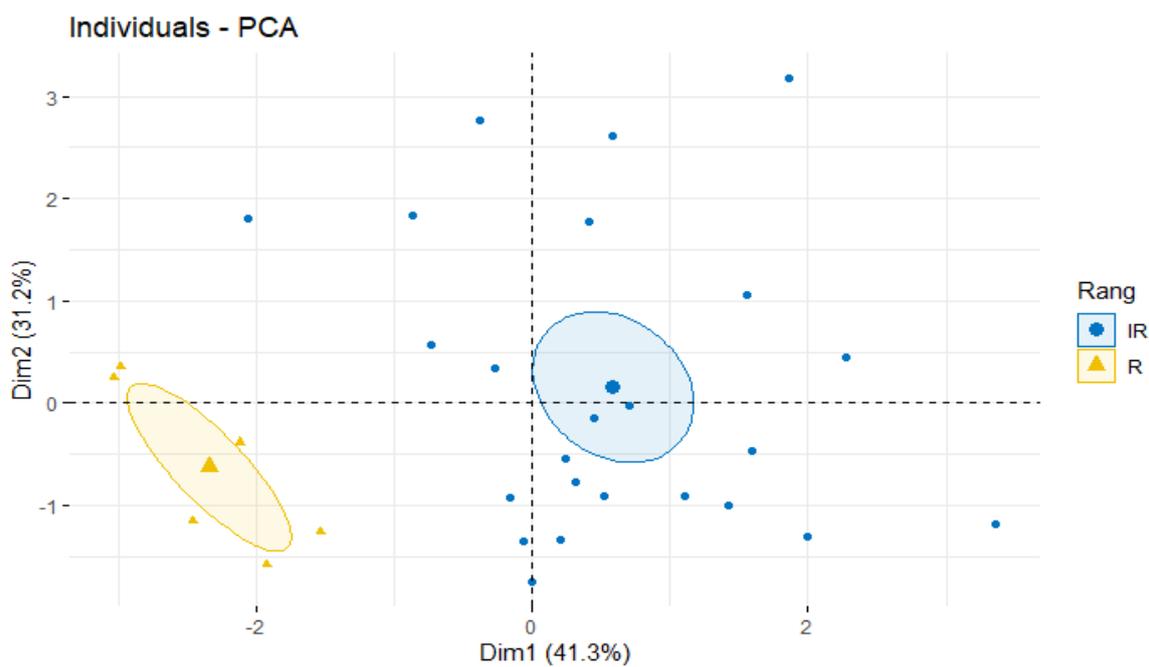


Figure 24: Étude du facteur position dans le verger selon les dimensions 1 et 2 de l'ACP

Différenciation des inter-rangs

Les modalités Rang et Inter-Rang vues précédemment ont été subdivisées pour étudier l'effet de l'éloignement à l'arbre (Figure 26). B1 correspond aux bandes maraîchères 1 (B1E et B1W), B2 aux bandes maraîchères 2 (B2E et B2W), Tem à la bande centrale et B1Inr à l'inter-rang pour la parcelle INRAE. Comme vu sur le graphique précédent, les arbres se distinguent du reste par l'évolution faible du flux au cours de la journée et des valeurs de flux maximal basses. Les flux de B1Inr se distinguent de ceux des bandes maraîchères du VM par le fait qu'ils présentent des valeurs de flux maximal plus élevées. L'évolution au cours de la journée est moyenne à rapide comparée aux bandes maraîchères. La précision apportée par cette analyse est que l'on peut distinguer les bandes 1 du verger-maraîcher et la bande témoin par rapport à l'évolution du flux au cours de la journée. Sur la bande témoin, le flux maximal est plus bas et atteint plus tard que sur les bandes 1. On a donc des courbes à l'allure plus régulière avec une évolution plus étalée dans le temps sur la modalité témoin. Les bandes 2 ont un comportement intermédiaire entre témoin et bandes 1.

5.3.3 ACP sur les données de l'INRAE seules

Pour savoir si les modalités d'apport d'azote se distinguent, les données de l'INRAE ont été analysées seules.

Le cercle des corrélations de cette analyse (figure 25) montre que l'axe 1 est expliqué principalement par l'amplitude du flux et l'axe 2 par la durée nécessaire pour atteindre le flux maximal.

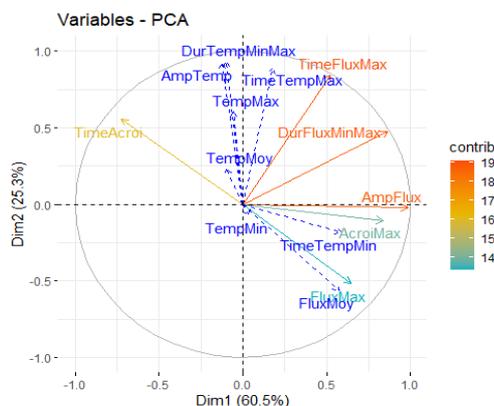


Figure 25: Contribution des variables pour l'analyse des flux du verger INRAE

La figure 27 montre que les modalités azote et sans azote se distinguent par la durée nécessaire pour atteindre le flux maximal qui est plus élevée pour la modalité sans azote que pour la modalité azotée. L'amplitude du flux est variable pour les deux modalités, ce qui peut s'expliquer par le fait que les rangs et inter-rangs sont ici combinés.

En conclusion, les mesures de respiration du sol n'ont pas permis de montrer de différence de flux moyen entre les modalités étudiées. En revanche on observe une différence de type de flux selon les modalités. Sous les arbres des deux parcelles, les flux sont d'amplitude plus faibles et se maintiennent à des valeurs basses comparé aux bandes maraîchères et à l'inter-rang du verger INRAE. Ce phénomène s'observe malgré le fait que le sol sur les rangs n'est pas géré de la même façon sur les deux parcelles. Sur le verger-maraîcher, les bandes les plus proches des arbres se distinguent de la modalité témoin par des flux qui augmentent de façon un peu plus rapide au cours de la journée et des flux maximaux plus élevés. Les bandes 2 ont un comportement intermédiaire entre les bandes 1 et la modalité témoin

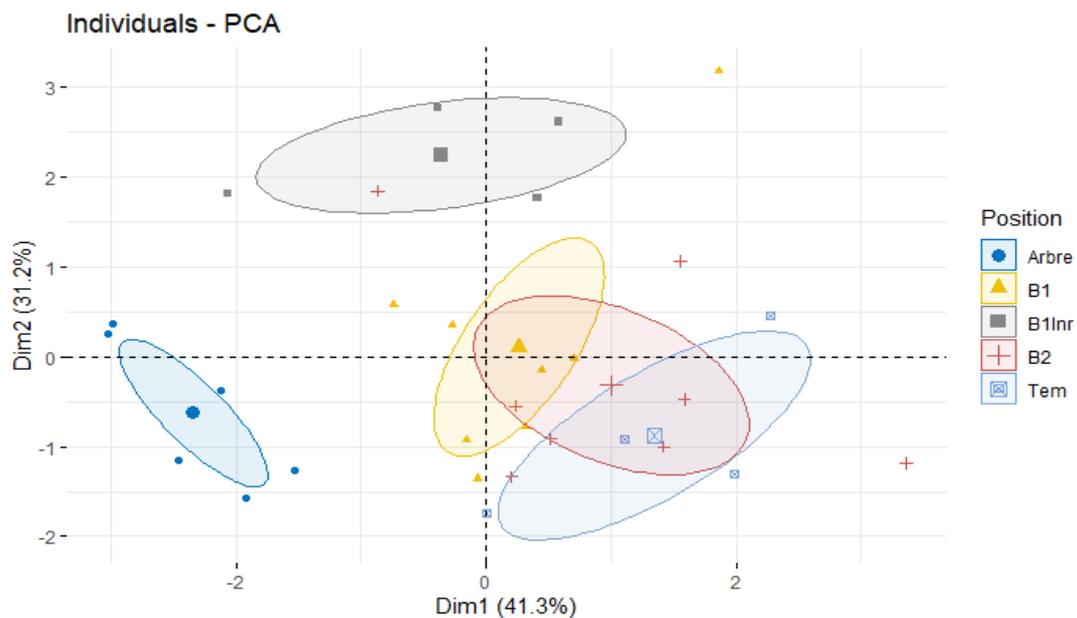


Figure 26: Étude du facteur position dans le verger selon les dimensions 1 et 2 de l'ACP en séparant les degrés d'éloignement aux arbres et en distinguant l'inter-rang du verger INRAE des bandes maraîchères du verger-maraîcher

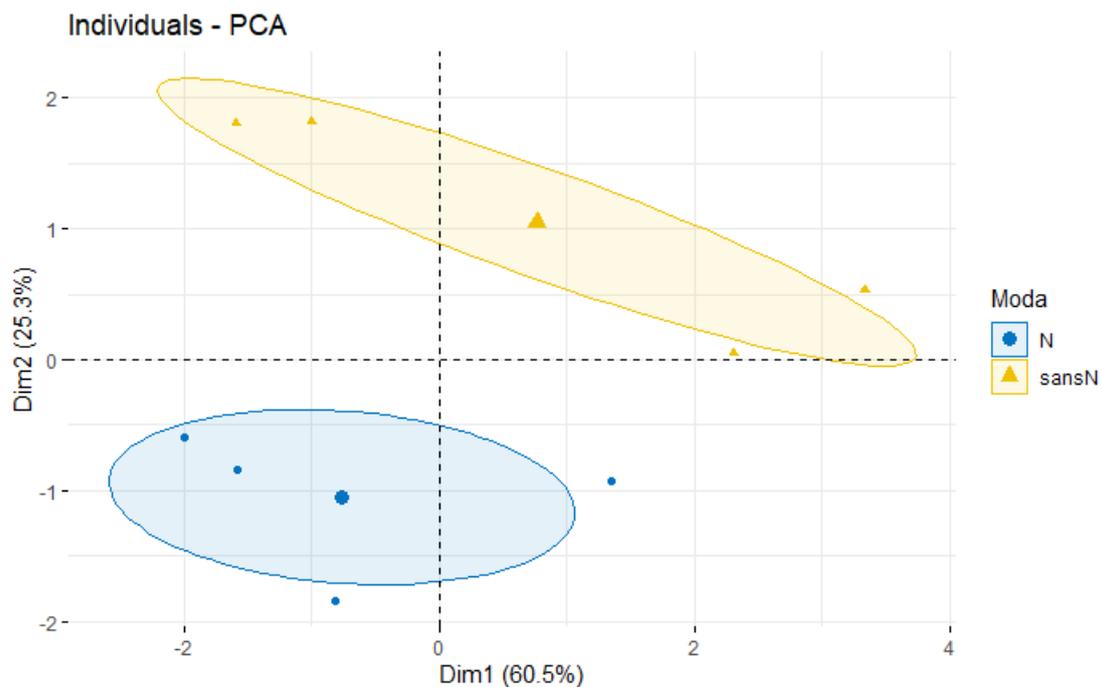


Figure 27: Caractérisation des flux pour les modalités d'apport d'azote sur le verger INRAE

5.4 Lien entre les variables mesurées

5.4.1 Lien entre les flux de respiration in situ et la température

Les figures 28, 29 et 30 montrent l'évolution journalière du flux de CO₂ et de la température du sol dans différentes modalités étudiées sur les parcelles verger-maraîcher et de l'INRAE.

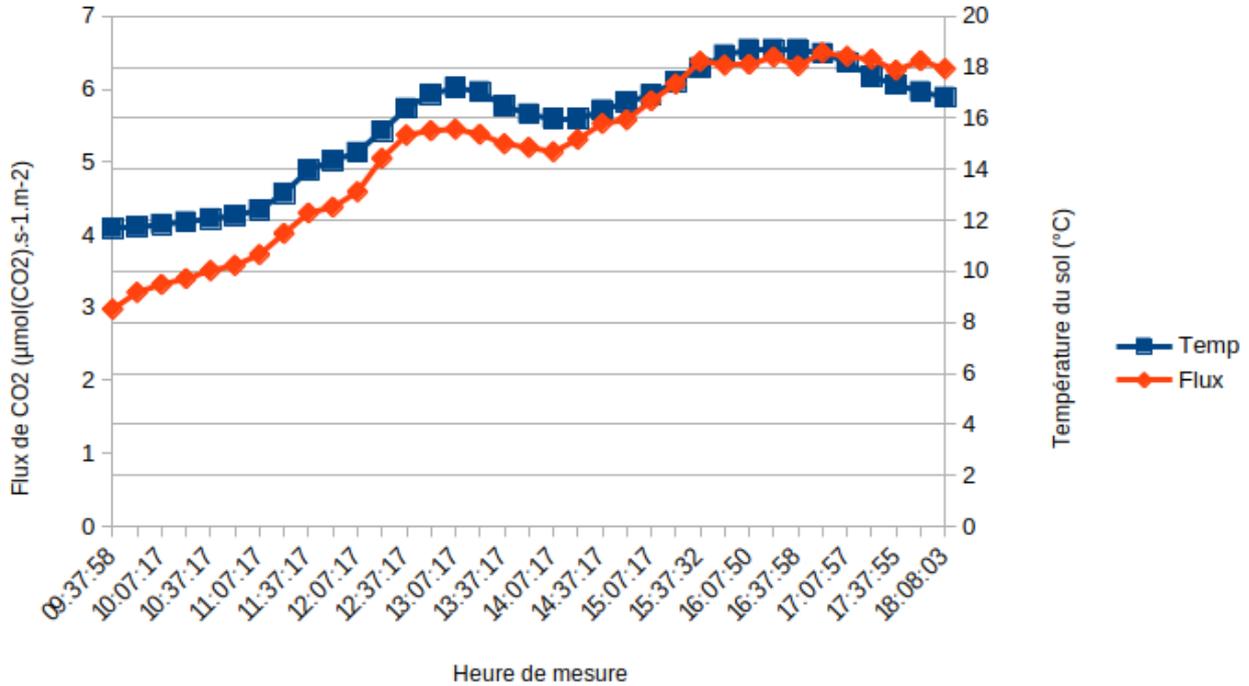


Figure 28: Evolution du flux de CO₂ et de la température du sol sur la bande maraîchère témoin (C) du verger-maraîcher le 26 avril 2021

Les courbes montrent que pour les modalités de la parcelle VM, l'évolution du flux de CO₂ suit celle de la température au cours de la journée, comme c'est le cas pour la modalité C du verger-maraîcher (figure 28) où le flux varie de 3 à 6,5 µmol CO₂.s⁻¹.m⁻² pour une variation de température de 12 à 19°C. En revanche sur les rangs d'arbre (figures 29 et 30), le flux de CO₂ n'évolue pas ou peu au cours de la journée. Il se maintient à des valeurs plus faibles que la modalité C : entre 2,3 et 2,9 µmol CO₂.s⁻¹.m⁻² (SansN_R) et de 3,4 à 3,9 µmol CO₂.s⁻¹.m⁻² (E) malgré l'augmentation des températures (respectivement de 11 à 23°C et de 18 à 21°C).

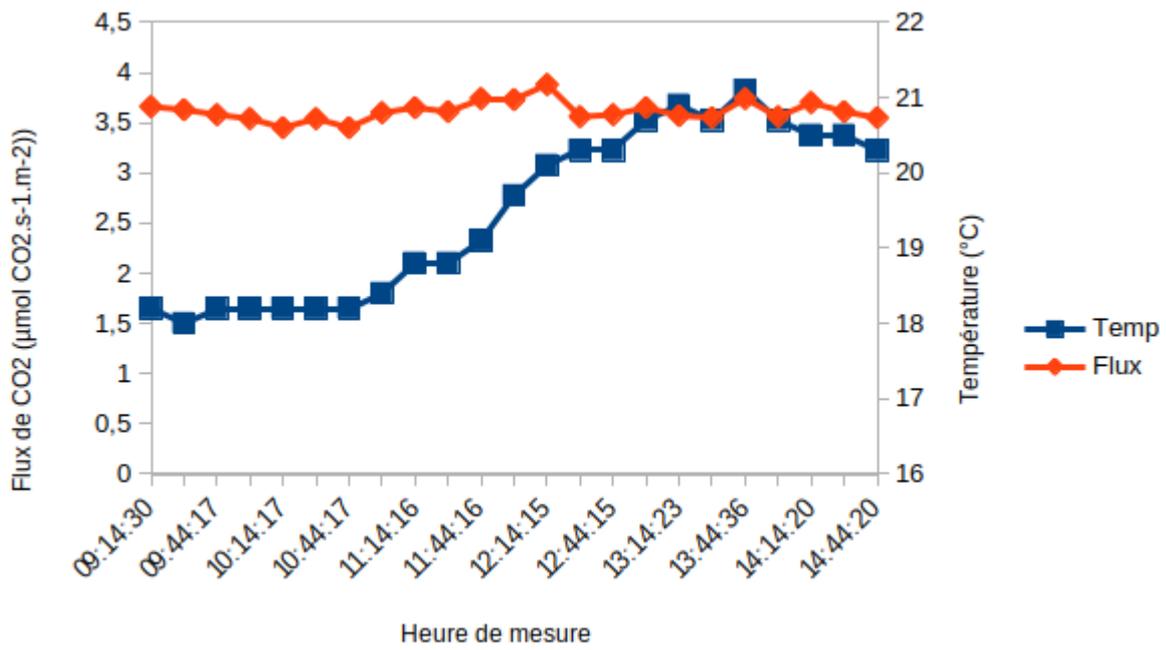


Figure 29: Evolution du flux de CO2 et de la température du sol sous le rang de pommiers Est (E) du verger-maraîcher le 15 juillet 2021

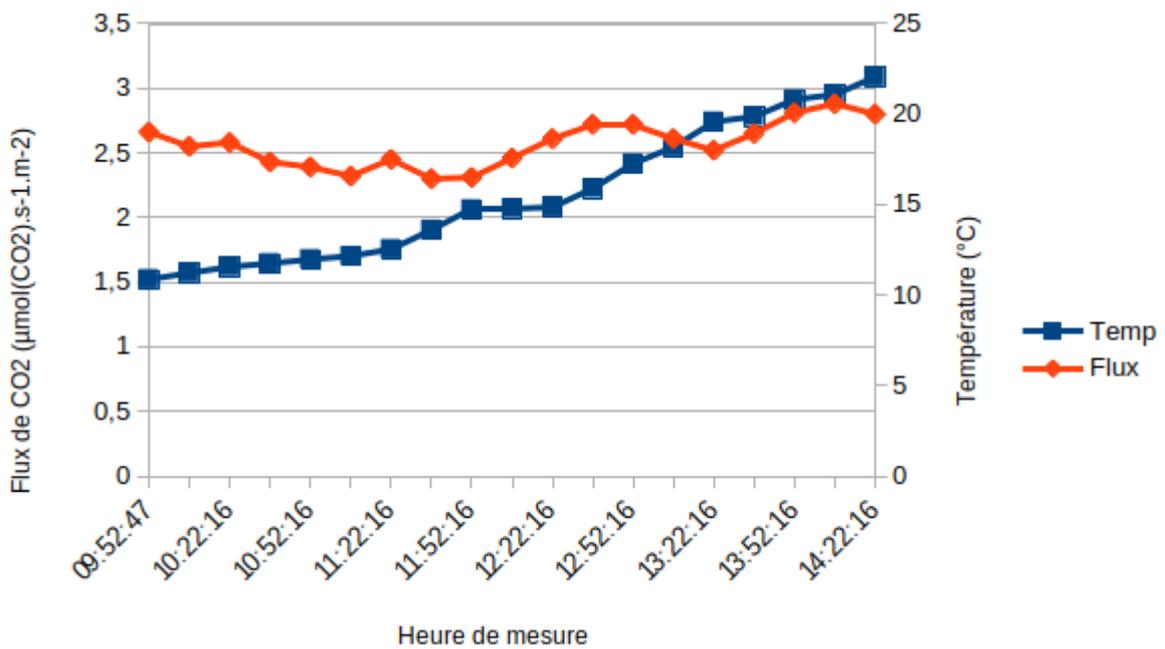


Figure 30: Evolution du flux de CO2 et de la température du sol sous le rang de pommiers de la modalité carencée en azote (SansN_R) du verger INRAE le 7 mai 2021

5.4.2 Lien entre teneur en matière organique et respiration du sol

Les graphiques suivants permettent d'évaluer le lien entre les teneurs en carbone et azote organiques mesurées, la respiration en conditions contrôlées et la respiration *in situ*.

Il n'a pas été effectué de test statistique mais les figures 31 et 32 montrent qu'il y a un lien faible entre la teneur en carbone organique dans le sol et les quantités de carbone émis en respiration basale et en respiration induite. Ce lien semble similaire entre les deux parcelles pour la respiration basale.

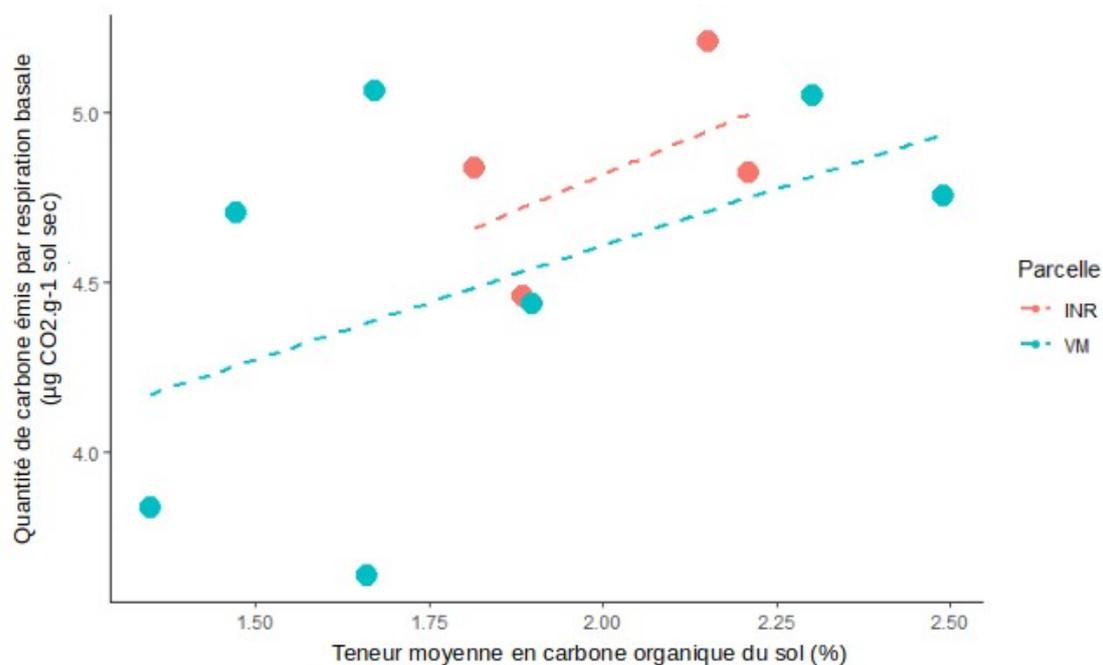


Figure 31: Lien entre la teneur en carbone total du sol et la respiration basale en conditions contrôlées (n=3)

La figure 33 ne montre pas de lien clair entre la teneur en carbone dans le sol et les flux moyens de CO₂ mesurés *in situ* cela coïncide avec le fait que les flux moyens ne se distinguent pas selon les modalités.

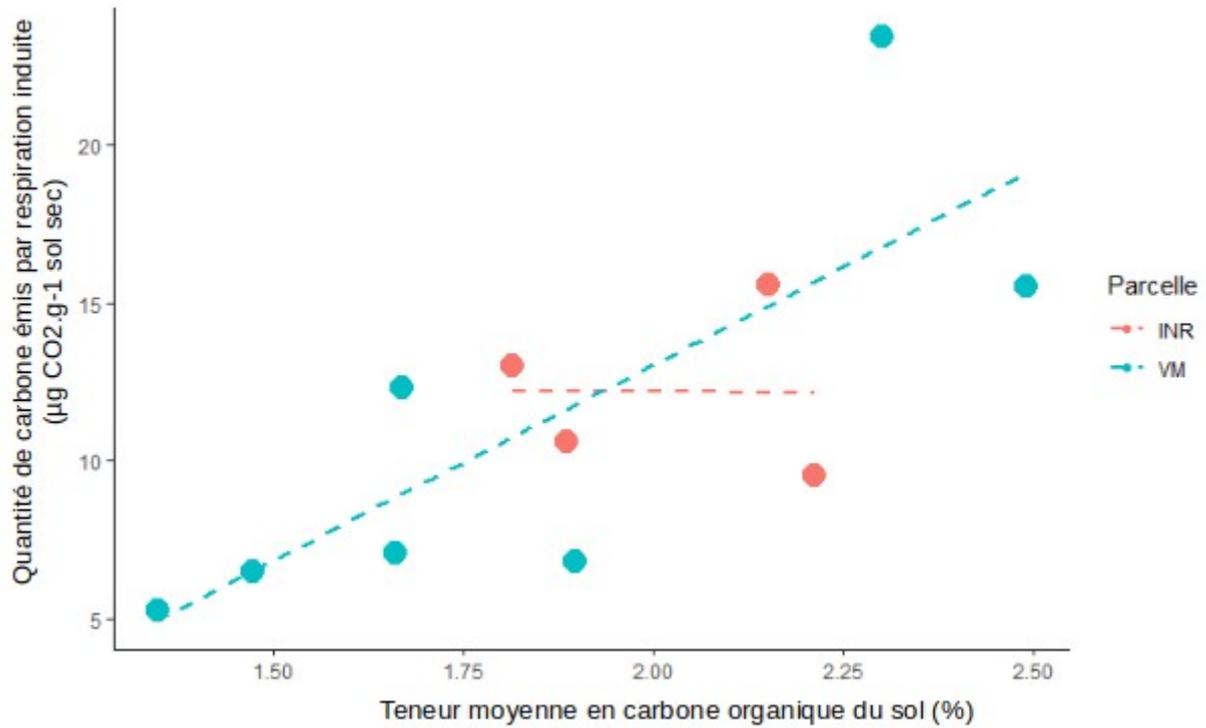


Figure 32: Lien entre la teneur en carbone total du sol et la respiration induite en conditions contrôlées ($n=3$)

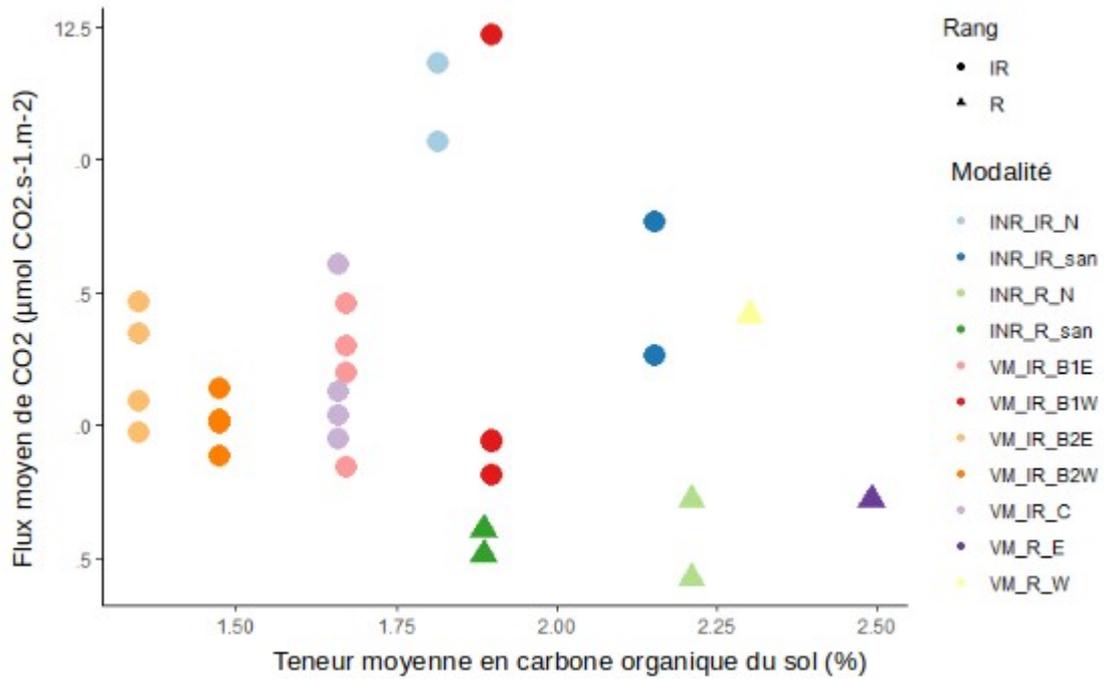


Figure 33: Lien entre la teneur moyen en carbone total du sol et le flux moyen journalier de respiration in situ. ($n_C=3$, $n_{\text{Flux INRAE}}=2$, $n_{\text{Flux VM bandes}}=4$, $n_{\text{Flux VM rang}}=1$)

5.4.3 Lien entre respiration en conditions contrôlées et en conditions réelles

Les figures 34 et 35 permettent d'évaluer le lien entre la respiration induite (indicateur de la population microbienne active) et la respiration du sol en condition réelle ainsi que le lien entre la respiration potentielle du sol en conditions idéales et la respiration *in situ*.

Il semble y avoir un lien entre la respiration basale mesurée en conditions optimales et en laboratoire et la respiration mesurée *in situ*, excepté pour les valeurs de respiration basale les plus basses, qui correspondent aux rangs de pommiers (figure 34). En revanche, il n'y a pas de tendance claire sur la relation entre le flux de CO₂ mesuré *in situ* et la respiration induite moyenne (figure 35).

D'après les figures 28 à 35, la température, la respiration induite en conditions contrôlées et la teneur en substrat carboné dans le sol ne suffisent donc pas à expliquer les flux de respiration observés en conditions réelles.

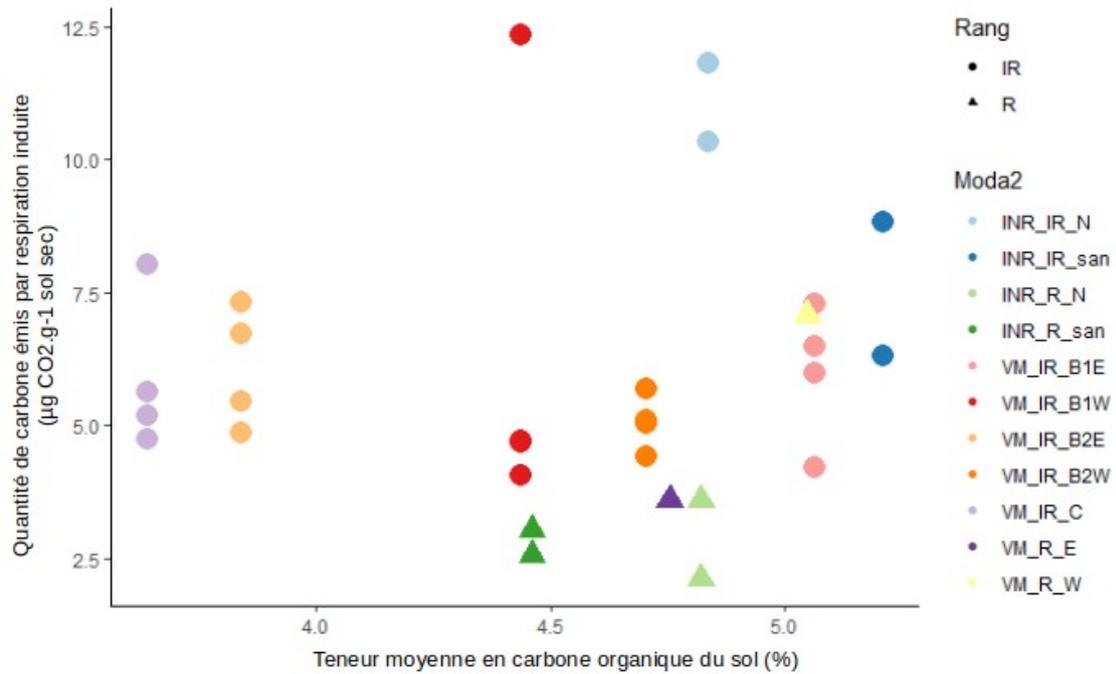


Figure 34: Lien entre le flux moyen journalier de respiration in situ et la quantité moyenne de carbone émis en respiration basale (Respectivement $n_{flux\ INRAE}=2$, $n_{VM\ bandes}=4$, $n_{VMrang}=1$, $n_{BAS}=48$)

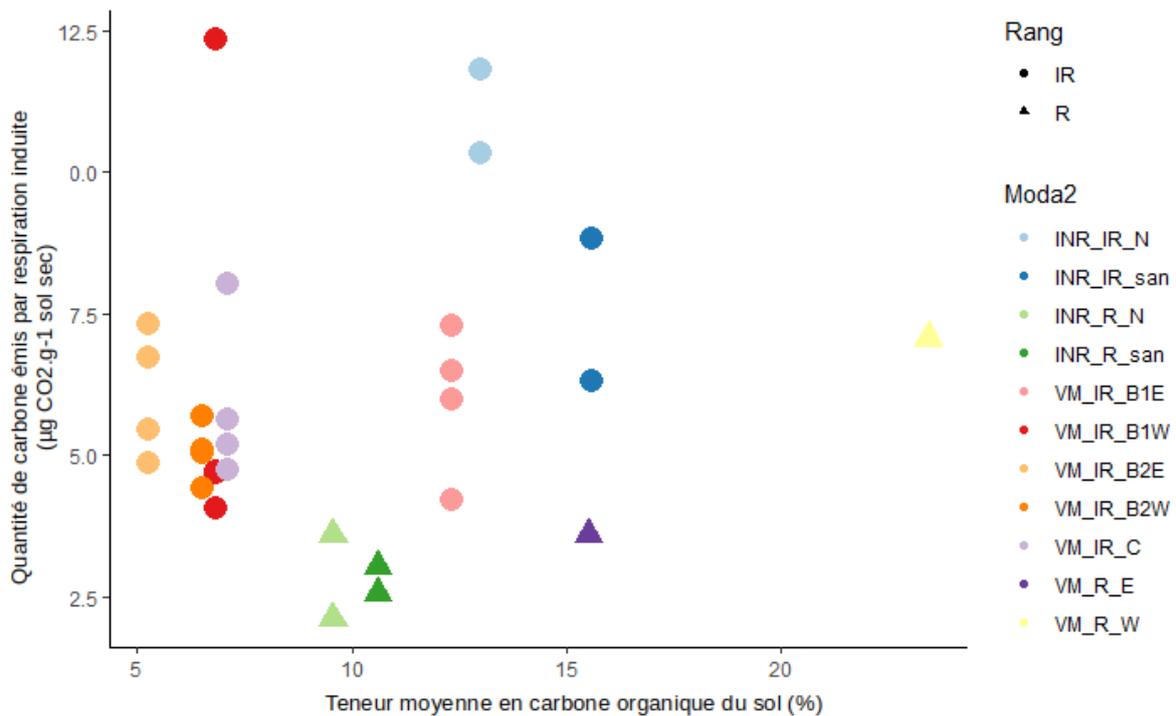


Figure 35: Lien entre le flux moyen journalier de respiration in situ et la quantité moyenne de carbone émis en respiration induite (Respectivement $n_{flux\ INRAE}=2$, $n_{VM\ bandes}=4$, $n_{VMrang}=1$, $n_{SIR}=48$)

5.5 Cycle de l'azote dans le sol : mesure de minéralisation de l'azote *in situ*

La vitesse de minéralisation est obtenue à partir de la valeur de minéralisation nette (N_{min}). Une valeur négative de N_{min} indique qu'il y a eu organisation de l'azote par les micro-organismes du sol. S'il y a organisation, il doit y avoir une cohérence entre les répétitions, ainsi pour les résultats présentés ici, la plupart des valeurs étaient positives, on a donc considéré qu'il n'y a pas eu d'organisation. Lorsque des valeurs négatives ont été déterminées, elles étaient très faibles et pour une répétition parmi les 3, elles ont donc été ramenées à 0.

5.5.1 Parcelle Verger-Maraîcher

Sur la figure 36, on observe un gradient ouest-est pour les vitesses de minéralisation, hormis pour la planche B2E qui présente une forte variabilité et une vitesse moyenne de minéralisation plus élevée que la planche B1E. Cependant les différences entre modalités ne sont pas significatives (p-value=0,5586).

Pour la période du 8 juin au 27 juillet, on n'observe pas non plus de différence significative entre les modalités (p-value = 0,3) mais des tendances sont tout de même visibles avec un gradient selon l'éloignement à l'arbre (figure 37). Cette tendance est similaire à celle observée pour les teneurs en azote et en carbone.

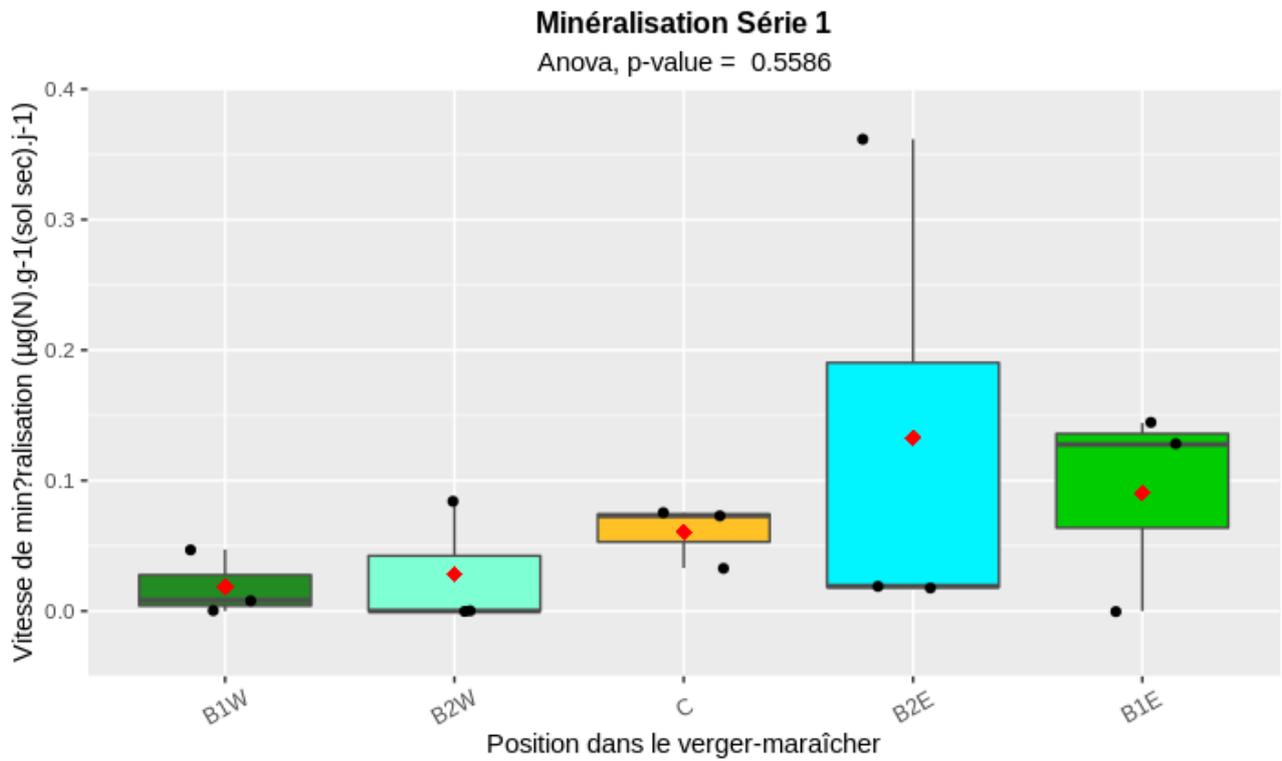


Figure 36: Vitesse de minéralisation de l'azote sur les différentes planches maraîchères pour la période du 5 mai au 7 juin 2021 (33 jours, n = 3).

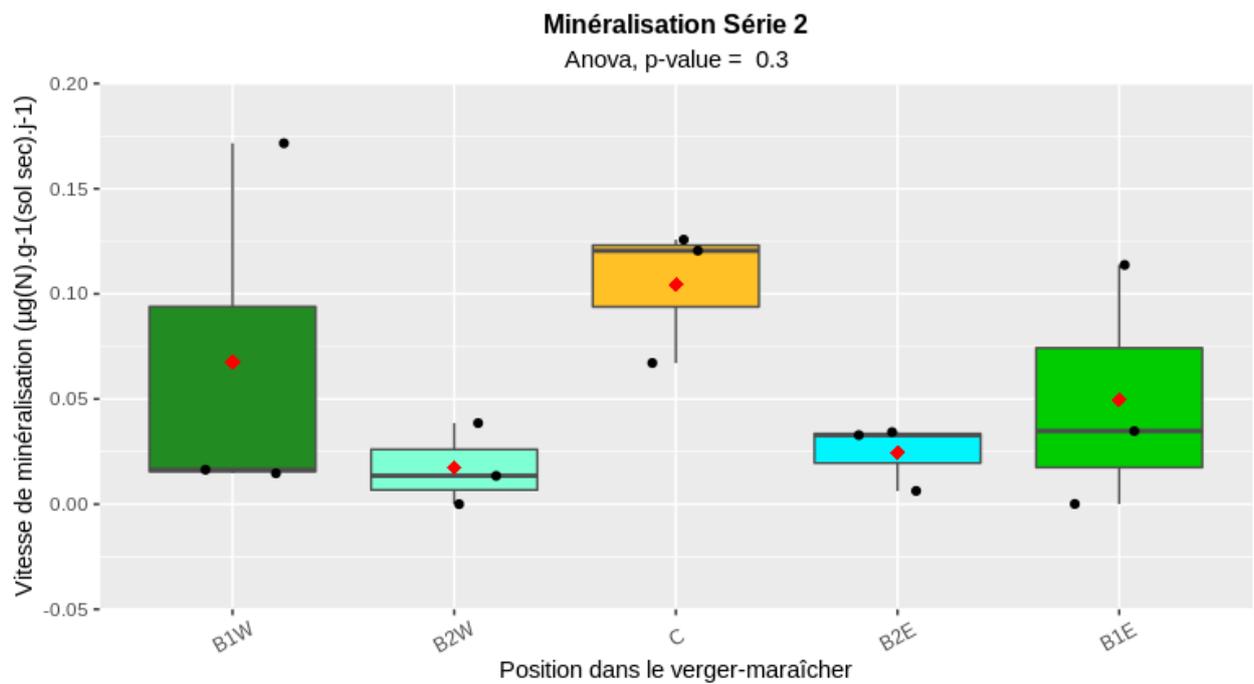


Figure 37: Vitesse de minéralisation de l'azote sur les différentes planches maraîchères pour la période du 8 juin au 27 juillet 2021 (49 jours, n=3)

5.5.2 Parcelle Inrae

Le test anova n'a pas montré de différence significative entre les modalités lors du mois de juin (p-value = 0,5) mais la vitesse moyenne de minéralisation est plus élevée dans les modalités Sans N_R et N_IR que dans les modalités N_R et SansN_IR, c'est la tendance inverse à celle des teneurs en azote total (figure 38).

Au cours du mois de juillet, les vitesses de minéralisation ne sont pas significativement différentes entre les modalités (p-value = 0,5618). Les valeurs moyennes sont un peu plus élevées dans l'inter-rang que sur le rang, pour les deux modalités d'apport d'azote (Figure 39).

Finalement la vitesse de minéralisation n'est pas différente selon les modalités de chacune des parcelles. De plus, bien que des tendances soient visibles, elles ne sont pas les mêmes entre les deux périodes de mesure.

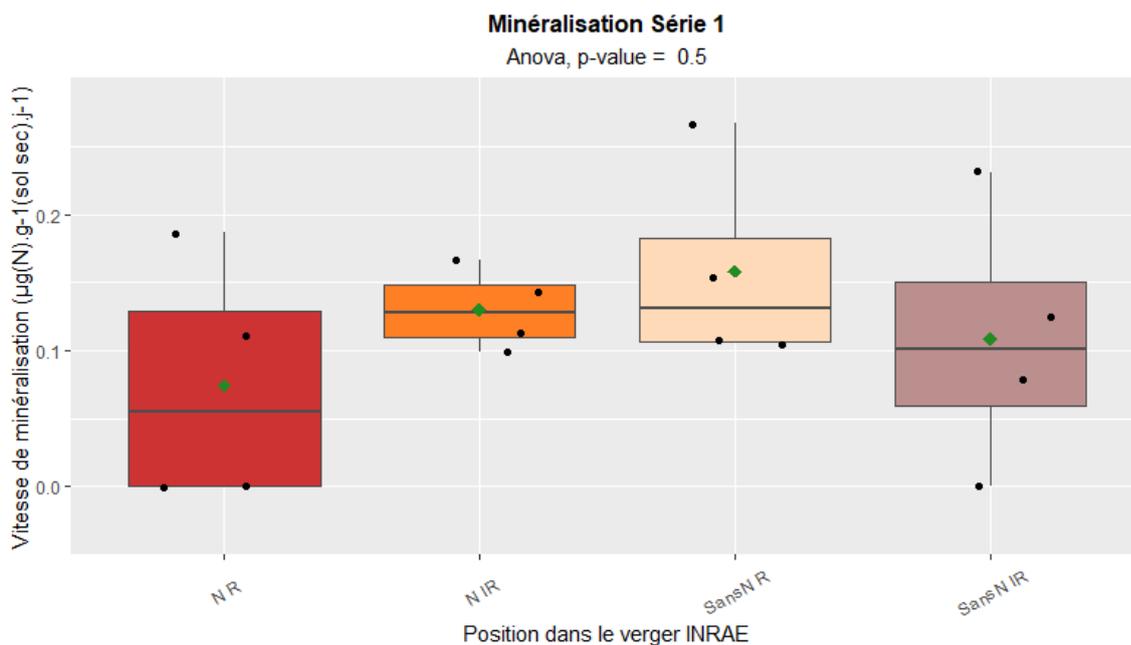


Figure 38: Vitesse de minéralisation de l'azote selon la position dans le verger INRAE pour la période du 21 mai au 21 juin 2021 (31 jours, n=4)

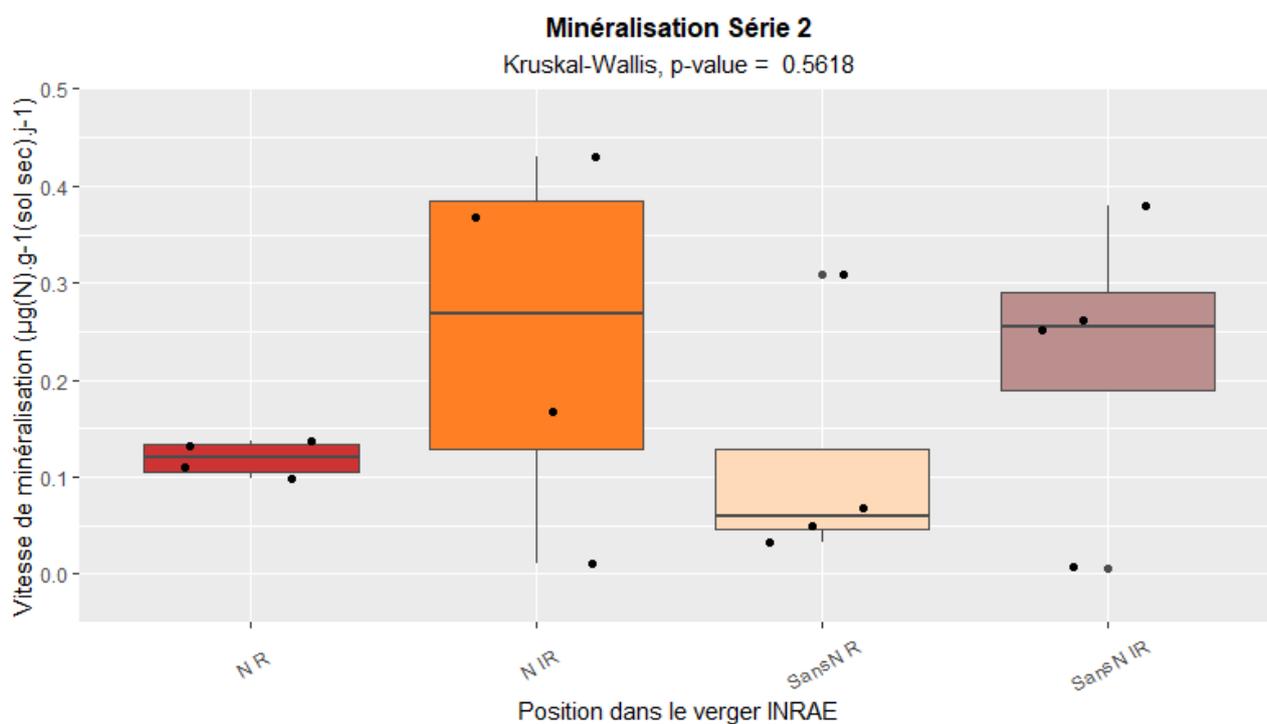


Figure 39: Vitesse de minéralisation de l'azote selon la position dans le verger INRAE pour la période du 1er juillet au 27 juillet 2021 (26 jours, n = 4)

6 Discussion

L'objectif de ce stage était d'évaluer l'impact des conduites de cultures de pommier associé ou non à une culture légumière, sur l'activité biologique des sols vue sous sa capacité à biodégrader les matières organiques. Deux types d'inter-rangs étaient donc présents, une culture de radis dans la parcelle de verger-maraîcher et un enherbement plus conventionnel dans la parcelle INRAE. Les résultats de cette étude ont permis de montrer que certaines modalités avaient des effets remarquables sur ces activités, qui nécessitent d'être discutés.

6.1 Effet des arbres sur les teneurs en C et N organiques du sol

Il y a bien un effet des arbres sur la matière organique et l'activité biologique du sol, comparé à des bandes cultivées non arborées. Cependant cet effet varie selon les paramètres mesurés et selon les parcelles.

D'abord, l'hypothèse H1 est validée pour le verger-maraîcher mais pas pour le verger de l'INRAE. Les teneurs en carbone organique sont plus importantes sous les arbres et il y a un gradient en fonction de l'éloignement à l'arbre. Toutefois la modalité témoin, la plus éloignée des arbres présente des teneurs similaires à celles des bandes B1. Ce résultat laisse supposer qu'il y a un apport en matière organique sur cette planche qui compense l'éloignement à l'arbre. Cet apport de MO peut être lié aux résidus de culture. En effet, lors de la première année de mesure du travail de thèse, les rendements en salade étaient les plus élevés sur la planche témoin, toutefois la différence de rendement n'était significative qu'avec la planche B2W. Les données des campagnes de culture suivantes ne sont pas disponibles mais il est possible que la production de biomasse soit plus élevée sur cette planche que sur les autres, fournissant ainsi davantage de matière organique au sol grâce à la décomposition des racines de salade.

Sur le verger de l'INRAE, aucune différence significative n'a été constatée entre les rangs d'arbres et les inter-rangs. Cette absence de différence peut être liée à la couverture du sol et aux pratiques culturales. En effet, le sol sous les arbres est nu et travaillé, alors que le sol de l'inter-rang est couvert avec un enherbement permanent. La présence de cet enherbement contribue à enrichir le sol en matières organiques via l'exsudation racinaire et la décomposition des tissus tels que les déchets de tonte. De plus, le travail du sol tel que réalisé dans les rangs induit une minéralisation accrue de la MO (Grayston et al. 1997 ; Wheatley et al. 1990 ; Delogu 2013). Ainsi, même si les arbres peuvent apporter de la MO au sol sur le rang, cet apport ne suffit pas pour atteindre les teneurs trouvées dans l'inter-rang, et ce malgré le fait qu'une modalité reçoit un apport de matière organique au sol au niveau du rang tandis que l'autre est carencée. En effet, la modalité azotée ne montre pas des teneurs significativement plus élevées bien qu'on puisse constater une tendance dans ce sens d'après les valeurs mesurées.

6.2 Biodégradabilité du carbone organique du sol

Concernant l'Hypothèse 2 sur l'activité biologique de dégradation de la matière organique, l'effet des arbres n'est pas toujours significatif et il n'y a pas forcément de lien direct entre la teneur en carbone organique et l'activité de dégradation de la MO.

Pour le verger maraîcher, les respirations basale et induite sont plus importantes sur les rangs d'arbres que sur les planches maraîchères et il semble y avoir un lien entre la respiration en conditions contrôlées et la teneur en C organique du sol. Cela coïncide avec les observations de plusieurs auteurs qui ont constaté une activité biologique supérieure à proximité des arbres, lié à l'apport de litière et la forte concentration en molécules organiques dans cette zone (Scandellari et al. 2015 ; Grayston et al. 1997).

Cependant on constate aussi d'autres tendances qui interfèrent avec la proximité des arbres et la teneur en MO. Sans prendre en compte les rangs d'arbres, la respiration basale augmente d'ouest en est au sein de la parcelle. Le micro-climat pourrait expliquer cette observation et particulièrement le rayonnement journalier cumulé – et par conséquent la température du sol – qui est plus important dans la partie Est en raison de la course du soleil. Ensuite la respiration induite montre des différences plus marquées entre les rangs d'arbres et les bandes maraîchères. Cette variable donne une indication sur la taille de la population microbienne active. Celle-ci est donc plus importante sous les arbres et sur la planche B1E. En revanche pour les planches B1W, B2W et C la respiration induite n'est pas différente alors que la respiration basale est significativement différente sur ces trois bandes : elle est plus élevée sur B2W, intermédiaire sur B1W et basse sur C. Les communautés microbiennes se comportent donc différemment et sur la planche B2W, en conditions optimales de température et d'humidité, elles vont avoir tendance à plus utiliser les substrats carbonés disponibles dans le sol.

Pour la parcelle de l'INRAE, la respiration basale semble liée à la teneur en carbone organique du sol. Pour la respiration induite, aucun lien avec la teneur en C n'a pu être mis en évidence, notamment à cause du faible nombre de données. De plus, les arbres ne favorisent pas l'activité de respiration pour cette parcelle car la respiration basale est soit équivalente soit plus faible que celle de l'inter-rang. En respiration induite, cette tendance se confirme car la respiration est plus importante dans l'inter-rang. La communauté microbienne active est donc plus importante dans l'inter-rang que sur le rang d'arbres. Ces différences pourraient s'expliquer par la gestion culturale du sol car le travail du sol peut influencer la taille, la composition et l'activité des communautés microbiennes (Delogu 2013 ; Leskovar et al. 2016).

Enfin, en condition *in situ*, les arbres ne semblent pas favoriser l'activité biologique de dégradation de la MO. Les flux de CO₂ sont moins importants sous les arbres que dans l'inter-rang ou sur les bandes maraîchères, quelle que soit la parcelle et il ne semble pas y avoir de lien entre les flux de CO₂ *in situ* et les teneurs en matière organique. Pour les bandes maraîchères on observe tout de même une variation en fonction de l'éloignement à l'arbre car les flux mesurés à proximité des arbres évoluent généralement plus vite au cours de la journée que sur la bande témoin. Il est possible que l'arbre ait un effet de limitation de la matière organique dans l'environnement racinaire, quel que soit le type de gestion du sol. (Delogu 2013) indique qu'il n'y a pas de relation simple entre quantité de substrat et flux de respiration. Les études mènent à des conclusions différentes car de nombreux facteurs entrent en interaction en condition réelles et influencent l'activité de dégradation de la MO.

6.3 Minéralisation de l'azote organique du sol

La présence des arbres et les teneurs en C et N organiques ne semblent pas expliquer l'activité de minéralisation de l'azote. La proximité avec les arbres n'induit pas une minéralisation accrue que ce soit dans les bandes de cultures de la parcelle VM ou les inter-rangs de la parcelle INRAE. Toutefois, sur le verger-maraîcher, on retrouve des tendances similaires à celles de la mesure de respiration basale ou des teneurs en C et N organiques. Pour la première période de mesure, on peut constater un gradient ouest-est d'augmentation des valeurs moyennes de minéralisation. Pour la seconde, on retrouve un gradient d'éloignement à l'arbre avec des valeurs légèrement plus élevées à proximité des arbres et sur la bande témoin. On peut donc en conclure que l'effet des arbres sur la minéralisation de l'azote n'est pas significativement différent de l'effet des autres couverts végétaux et qu'il entre en interaction avec d'autres facteurs comme l'orientation des bandes maraîchères. Il est également possible que les organismes présents dans les sols étudiés et responsables de la minéralisation de l'azote ne soient pas ou peu influencés par la présence des arbres, des cultures ou de l'enherbement. Cette dernière hypothèse est cohérente avec les observations de (Wheatley et al. 1990). En effet ils n'ont pas observé de différence de communautés microbiennes (taille, masse) et

d'activité biologique (respiration basale, induite et minéralisation de l'azote) entre la rhizosphère de plantes cultivées (orge, pois, ray-grass et navet) et un sol sans culture. D'autres études ont montré que les plantes pouvaient avoir un effet variable sur la minéralisation de l'azote dans le sol (Grayston et al. 1997). Elles peuvent soit la défavoriser en apportant des substrats carbonés en excès par rapport à l'azote minéral disponible, ce qui provoque une organisation plutôt qu'une minéralisation de l'azote. Dans d'autres cas la minéralisation brute (sans prendre en compte l'organisation) peut être favorisée par la présence de plantes et la libération d'exsudations racinaires. Cependant certains auteurs considèrent que la minéralisation induite par les racines représente une très faible proportion de l'activité de minéralisation dans le sol en général (Wheatley et al. 1990 ; Grayston et al. 1997).

6.4 Gestion de la couverture du sol et des intrants

Concernant l'hypothèse 3 formulée en début de ce mémoire, on peut constater un effet de l'enherbement sur la respiration du sol en conditions contrôlées et *in situ*. Les valeurs sont plus élevées dans l'inter-rang enherbé. En revanche on n'observe pas de différence pour la minéralisation de l'azote. Sous les arbres en condition de sol nu, la minéralisation de l'azote et la respiration ne sont pas favorisées. Cela peut-être dû à un effet plus important des arbres qui s'observe également sur le verger-maraîcher. (Blanke 1996) a mesuré des flux plus importants sur des planches cultivées en buttes et surélevées que sous des pommiers. De plus, les flux mesurés sur l'inter-rang ont été considérés comme représentant la respiration du sol mais du fait de la présence du couvert, ils comprennent également la respiration autotrophe des parties aériennes des plantes qui peuvent introduire un biais. Cependant ce biais semble limité car sur les rangs d'arbres enherbés du verger-maraîcher, les flux mesurés restent faibles malgré la présence du couvert végétal.

La fertilisation azotée dans la parcelle INRAE influence peu les teneurs en MO du sol mais elle influence les micro-organismes responsables de la minéralisation de la MO. La communauté microbienne active est plus importante dans la modalité sans azote mais la respiration basale est plus élevée dans le rang de la modalité azotée que dans le rang de la modalité sans azote. Les flux de respiration *in situ* sont également différents entre les deux modalités, au cours d'une journée, le pic de respiration est atteint plus tôt dans la modalité azotée. Ces différences correspondent au fait que les amendements peuvent favoriser l'activité d'utilisation des substrats par les micro-organismes (Delogu 2013 ; Grayston et al. 1997).

7 Conclusion

Ce travail de stage visait à caractériser l'activité biologique des sols dans deux vergers de pommiers, l'un en conduite conventionnelle classique, l'autre en système agroforestier. On cherchait à connaître l'influence des arbres sur la dégradation de la matière organique par les micro-organismes du sol.

Ce travail a montré des différences d'activité biologique entre les modalités étudiées. Pour le verger-maraîcher, l'activité biologique suit un gradient d'éloignement à l'arbre et pour l'INRAE, l'activité biologique est globalement plus intense sur l'inter-rang que sur le rang. L'utilisation de mesures en conditions contrôlées et *in situ* a permis de caractériser non seulement une activité potentielle, mais aussi l'expression de cette activité en conditions réelles. Cependant, il s'agissait d'une étude exploratoire et les mesures se sont concentrées sur des phénomènes témoins de l'activité des micro-organismes mais les communautés n'ont pas été étudiées directement. Ces éléments restent donc à caractériser si l'on veut analyser de façon plus complète ce qu'il se passe dans les parcelles étudiées. Les mesures de biomasse microbienne par fumigation extraction permettent par exemple de connaître plus précisément la quantité de micro-organismes présents dans le sol. Par ailleurs la mesure de l'activité de dégradation de la matière organique reste soumise à de nombreux paramètres qui entrent en interaction et qui peuvent être difficilement dissociables et mesurables, d'autant plus dans des systèmes agroforestiers complexes. Parmi ces paramètres, la qualité biochimique de la MO est un déterminant majeur qui mériterait d'être étudié également sur les parcelles considérées dans ce travail.

A plus long terme, l'étude d'autres parcelles agroforestières permettra d'approfondir les connaissances sur le fonctionnement du cycle de la MO, et en particulier de la mise à disposition d'éléments minéraux pour les plantes. L'approfondissement des connaissances dans ce domaine pourrait permettre de mieux gérer le cycle des nutriments et de la fertilisation dans des systèmes de verger et de verger-maraîcher.

Bibliographie

ALLEN, Sam C., JOSE, Shibu, NAIR, P.K.R., BRECKE, Barry J., NKEDI-KIZZA, Peter et RAMSEY, Craig L., 2004. Safety-net role of tree roots: evidence from a pecan (*Carya illinoensis* K. Koch)–cotton (*Gossypium hirsutum* L.) alley cropping system in the southern United States. In : *Forest Ecology and Management*. mai 2004. Vol. 192, n° 2-3, pp. 395-407. DOI 10.1016/j.foreco.2004.02.009.

ALTIERI, Miguel A, 1999. The ecological role of biodiversity in agroecosystems. In : . 1999. pp. 13.

BACHELIER, Georges, 1963. Déterminisme de la faune des sols. In : *La vie animale dans les sols*. S.l. : Orstom.

BAMBRICK, Amanda D., WHALEN, Joann K., BRADLEY, Robert L., COGLIASTRO, Alain, GORDON, Andrew M., OLIVIER, Alain et THEVATHASAN, Naresh V., 2010. Spatial heterogeneity of soil organic carbon in tree-based intercropping systems in Quebec and Ontario, Canada. In : *Agroforestry Systems*. 2010. n° 79, pp. 11. DOI 10.1007/s10457-010-9305-z.

BERGERON, Mélanie, LACOMBE, Simon, BRADLEY, Robert L., WHALEN, Joann, COGLIASTRO, A., JUTRAS, Marie-France et ARP, Paul, 2011. Reduced soil nutrient leaching following the establishment of tree-based intercropping systems in eastern Canada. In : *Agroforestry Systems*. novembre 2011. Vol. 83, n° 3, pp. 321-330. DOI 10.1007/s10457-011-9402-7.

BERNER, Alfred, BÖHM, Herwart, BRANDHUBER, Robert, BRAUN, Josef, BREDE, Uwe, COLLING-VON ROESGEN, Jean-Louis et DEMMEL, Markus, 2013. Les principes de la fertilité des sols. In : *Bio Suisse /FiBL*. 2013. pp. 32.

BLANKE, Michael M., 1996. Soil respiration in an apple orchard. In : *Environmental and Experimental Botany*. octobre 1996. Vol. 36, n° 3, pp. 339-348. DOI 10.1016/0098-8472(96)01003-9.

BUTTERBACH-BAHL, Klaus, OLE SANDER, Björn, PELSTER, David et DÍAZ-PINÉS, Eugenio, 2016. Quantifying Greenhouse Gas Emissions from Managed and Natural Soils. In : *Methods for Measuring Greenhouse Gas Balances and Evaluating Mitigation Options in Smallholder Agriculture*. S.l. : Springer International Publishing. pp. 71-96.

CAMPBELL, Colin D, CHAPMAN, Stephen J, CAMERON, Clare M, DAVIDSON, Michell S et POTTS, Jacqueline M, 2003. A Rapid Microtiter Plate method to measure carbon dioxide evolved from carbon substrate amendments so as to determine the physiological profiles of soil microbial communities by using whole soil. In : *Applied and environmental microbiology*. juin 2003. Vol. 69, n° 6. DOI 10.1128/AEM.69.6.3593–3599.2003.

CARDINAEL, Rémi, CHEVALLIER, Tiphaine, BARTHÈS, Bernard G., SABY, Nicolas P. A., PARENT, Théophile, DUPRAZ, Christian, BERNOUX, Martial et CHENU, Claire, 2015. Impact of alley cropping agroforestry on stocks, forms and spatial distribution of soil organic carbon — A case study in a Mediterranean context. In : *Geoderma*. 1 décembre 2015. Vol. 259-260, pp. 288-299. DOI 10.1016/j.geoderma.2015.06.015.

CHAMBRE D'AGRICULTURE OCCITANIE, 2011. Les matières organiques du sol. In : *Guide des produits organiques utilisables en Languedoc-Roussillon - Tome 1*. S.l. : s.n. pp. 12.

DELAHAIE, Mahault, BOISSIÈRES, Manon, GIULIANO, Laurent, BEDOUSSAC, Laurent et ALLETTO, Lionel, 2016. Fertilité biologique des sols : Définition. In : *Dictionnaire d'agroécologie* [en ligne]. 2016. [Consulté le 18 mai 2021]. Disponible à l'adresse : <https://dicoagroecologie.fr/encyclopedie/fertilite-biologique-des-sols/>.

DELOGU, Elodie, 2013. *Modélisation de la respiration du sol dans les agro-écosystèmes* [en ligne]. S.l. : Université Toulouse III Paul Sabatier. Disponible à l'adresse : <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-00953712/document>.

DEQUIEDT, Samuel et RANJARD, Lionel, 2021. La qualité microbiologique des sols agricoles. In : *Rendez-vous RMQS2*. S.l. 2021.

DÍAZ-PÉREZ, Juan C., 2009. Root zone temperature, plant growth and yield of broccoli [Brassica oleracea (Plenck) var. italica] as affected by plastic film mulches. In : *Scientia Horticulturae*. décembre 2009. Vol. 123, n° 2, pp. 156-163. DOI 10.1016/j.scienta.2009.08.014.

DUPARQUE, Annie, 2017. La matière organique des sols, une richesse à cultiver.... In : *Colloque « La matière organique : clé de voûte de l'agriculture de demain ? »* [en ligne]. Auch. 28 novembre 2017. [Consulté le 18 mai 2021]. Disponible à l'adresse : http://gabb32.org/wp-content/uploads/2017/12/MOS_Richesse-a-cultiver_A-Duparque_AGT-RT_BioGers_281117_AUCH_vf.pdf.

FONTAINE, Sébastien, MARIOTTI, André et ABBADIE, Luc, 2003. The priming effect of organic matter: a question of microbial competition? In : *Soil Biology and Biochemistry*. 1 juin 2003. Vol. 35, n° 6, pp. 837-843. DOI 10.1016/S0038-0717(03)00123-8.

GONZALEZ-FUENTES, Jose A., SHACKEL, Kenneth, HEINRICH LIETH, J., ALBORNOZ, Francisco, BENAVIDES-MENDOZA, Adalberto et EVANS, Richard Y., 2016. Diurnal root zone temperature variations affect strawberry water relations, growth, and fruit quality. In : *Scientia Horticulturae*. mai 2016. Vol. 203, pp. 169-177. DOI 10.1016/j.scienta.2016.03.039.

GRAYSTON, S.J., VAUGHAN, D. et JONES, D., 1997. Rhizosphere carbon flow in trees, in comparison with annual plants: the importance of root exudation and its impact on microbial activity and nutrient availability. In : *Applied Soil Ecology*. janvier 1997. Vol. 5, n° 1, pp. 29-56. DOI 10.1016/S0929-1393(96)00126-6.

HATFIELD, Jerry L. et WALTHALL, Charles L., 2015. Soil Biological Fertility: Foundation for the Next Revolution in Agriculture? In : *Communications in Soil Science and Plant Analysis*. 26 mars 2015. Vol. 46, n° 6, pp. 753-762. DOI 10.1080/00103624.2015.1005227.

ISO, 1995. ISO 10694:1995 - Soil quality — Determination of organic and total carbon after dry combustion (elementary analysis) [en ligne]. mars 1995. [Consulté le 30 août 2021]. Disponible à l'adresse : <https://www.iso.org/cms/render/live/en/sites/isoorg/contents/data/standard/01/87/18782.html>.

JAMAR, Laurent, AUBINET, Marc, CULOT, Marc, HUGO, Magein et LATEUR, Marc, 2009. Évaluation de l'activité biologique du sol en verger biologique et conventionnel. In : *Journées Techniques Fruits et Légumes Biologiques*. 8 décembre 2009. pp. 4.

JENNY, Hans et GROSSENBACHER, Karl, 1963. Root-Soil Boundary Zones as Seen in the Electron Microscope. In : *Soil Science Society of America Journal*. 1963. Vol. 27, n° 3, pp. 273-277. DOI <https://doi.org/10.2136/sssaj1963.03615995002700030018x>.

JONES, David L., HODGE, Angela et KUZUYAKOV, Yakov, 2004. Plant and mycorrhizal regulation of rhizodeposition. In : *New Phytologist*. septembre 2004. Vol. 163, n° 3, pp. 459-480. DOI 10.1111/j.1469-8137.2004.01130.x.

KEUSKAMP, Joost A., DINGEMANS, Bas J. J., LEHTINEN, Taru, SARNEEL, Judith M. et HEFTING, Mariet M., 2013. Tea Bag Index: a novel approach to collect uniform decomposition data across ecosystems. In : MULLER-LANDAU, Helene (éd.), *Methods in Ecology and Evolution*. novembre 2013. Vol. 4, n° 11, pp. 1070-1075. DOI 10.1111/2041-210X.12097.

L'AGRO REPORTER, 2013. Méthode du bilan azoté - Episode 2/3 « la minéralisation nette de l'azote organique du sol ». In : [en ligne]. 28 novembre 2013. [Consulté le 29 août 2021]. Disponible à l'adresse : <http://agro-reporter.blogspot.com/2013/11/methode-du-bilan-azote-episode-23-la.html>.

LESKOVAR, Daniel, OTHMAN, Yahia et DONG, Xuejun, 2016. Strip tillage improves soil biological activity, fruit yield and sugar content of triploid watermelon. In : *Soil and Tillage Research*. novembre 2016. Vol. 163, pp. 266-273. DOI 10.1016/j.still.2016.06.007.

LIAGRE, Fabien, SANTI, Frédérique, BACHEVILLIER, Yves et SOTTEAU, Christophe, 2017. Produire avec les arbres pour une agriculture différente. In : . 2017. pp. 24. DOI hal-02790807.

MARSDEN, Claire, 2014. Les caractéristiques de la matière en décomposition : récalcitrance, teneur en nutriments, taille des fragments. In : *Sup Agro- UVED Processus écologiques* [en ligne]. 2014. [Consulté le 18 mai 2021]. Disponible à l'adresse : https://www.supagro.fr/ress-pepites/processusecologiques/co/CaracteristiqueMO_1.html#:~:text=D%27autres%20mati%C3%A8res%20sont%20dites,s%C3%A9cheresse%20et%20%C3%A0%20%27herbivorie.

NAIR, P. K. R., 1993. *An introduction to agroforestry*. Dordrecht ; Boston : Kluwer Academic Publishers in cooperation with International Centre for Research in Agroforestry. ISBN 978-0-7923-2134-7. S494.5.A45 N3543 1993

PARDON, P., REUBENS, B., REHEUL, D., MERTENS, J., DE FRENNE, P., COUSSEMENT, T., JANSSENS, P. et VERHEYEN, K., 2017. Trees increase soil organic carbon and nutrient availability in temperate agroforestry systems. In : *Agriculture, Ecosystems & Environment*. septembre 2017. Vol. 247, pp. 98-111. DOI 10.1016/j.agee.2017.06.018.

PAUT, Raphaël, 2020. Analyse des compromis entre diversité cultivée et complexité de gestion à travers le cas d'étude du Verger-Maraîcher. Une approche combinant modélisation et méthodes qualitatives. In : *INRAE*. 2020. pp. 263. DOI tel-03128903.

POSZWA, Anne, DAMBRINE, Etienne, FERRY, Bruno et LOUBET, Michel, 2002. Do deep tree roots provide nutrients to the tropical rainforest? In : *Biogeochemistry*. 2002. n° 60, pp. 22.

RAISON, R.J., CONNELL, M.J. et KHANNA, P.K., 1987. Methodology for studying fluxes of soil mineral-N in situ. In : *Soil Biology and Biochemistry*. janvier 1987. Vol. 19, n° 5, pp. 521-530. DOI 10.1016/0038-0717(87)90094-0.

RAMANANJATOVO, Toky, 2019. *Systèmes verger-maraîcher : recherche appliquée dans le continuum sol-plante-atmosphère. Premier rapport présenté au Comité de Suivi Individuel de thèse - document non publié*. Angers. AgroCampus Ouest Angers.

SADEGHI, Hossein et TABAN, Azin, 2021. Crushed maize seeds enhance soil biological activity and salt tolerance in caper (*Capparis spinosa* L.). In : *Industrial Crops and Products*. 1 février 2021. Vol. 160, pp. 113103. DOI 10.1016/j.indcrop.2020.113103.

SCANDELLARI, F., ZANOTELLI, D., CECCON, C., BOLOGNESI, M., MONTAGNANI, L., CASSOL, P., MELO, G.W. et TAGLIAVINI, M., 2015. Enhancing prediction accuracy of soil respiration in an apple orchard by integrating photosynthetic activity into a temperature-related model. In : *European Journal of Soil Biology*. septembre 2015. Vol. 70, pp. 77-87. DOI 10.1016/j.ejsobi.2015.07.006.

SIEBERT, Julia, THAKUR, Madhav P., REITZ, Thomas, SCHÄDLER, Martin, SCHULZ, Elke, YIN, Rui, WEIGELT, Alexandra et EISENHAUER, Nico, 2019. Chapter Two - Extensive grassland-use sustains high levels of soil biological activity, but does not alleviate detrimental climate change effects. In : BOHAN, David A. et DUMBRELL, Alex J. (éd.), *Advances in Ecological Research* [en ligne]. S.l. : Academic Press. Resilience in Complex Socio-ecological Systems. pp. 25-58. [Consulté le 14 mai 2021]. Disponible à l'adresse : <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0065250419300029>.

TORQUEBIAU, Emmanuel F, 2000. A renewed perspective on agroforestry concepts and classification. In : *Comptes Rendus de l'Académie des Sciences - Series III - Sciences de la Vie*. 1 novembre 2000. Vol. 323, n° 11, pp. 1009-1017. DOI 10.1016/S0764-4469(00)01239-7.

TRAORÉ, K B, MCCARTHY, G, GIGOU, J S, DOUMBIA, M D, BAGAYOKO, A, KONARÉ, H, DIONI, L et COULIBALY, H, 2002. Aménagement en courbes de niveau et conservation du carbone. In : . 2002. pp. 10.

VALÉ, Matthieu, 2006. *Quantification et prédiction de la minéralisation nette de l'azote du sol in situ, sous divers pédoclimats et systèmes de culture français*. Auzeville : Institut National Polytechnique de Toulouse.

WACHS, Mélissa, 2016. *Étude bioclimatique d'un verger-maraîcher : quelles influences du contexte paysager et de la gestion du sol sur le microclimat pour la fertilité du sol ?* Nancy. Université de Lorraine, Arbre et Paysage 32.

WARLOP, François, CORROYER, Nathalie, DENIS, Alice, CONSEIL, Mathieu, FOURRIÉ, Laetitia, DUHA, Guillaume, BUCHMANN, Charles, LAFON, Aubin et SERVAN, Grégoire, 2017. *Associer légumes et arbres fruitiers en agroforesterie : Principes, éléments techniques et points de vigilance pour concevoir et conduire sa parcelle*. 2017. S.l. : Projet SMART.

WHEATLEY, Ron, RITZ, Karl et GRIFFITHS, Bryan, 1990. Microbial biomass and mineral N transformations in soil planted with barley, ryegrass, pea or turnip. In : *Plant and Soil*. octobre 1990. Vol. 127, n° 2, pp. 157-167. DOI 10.1007/BF00014422.

WOŁEJKO, Elżbieta, JABŁOŃSKA-TRYPUĆ, Agata, WYDRO, Urszula, BUTAREWICZ, Andrzej et ŁOZOWICKA, Bożena, 2020. Soil biological activity as an indicator of soil pollution with pesticides – A review. In : *Applied Soil Ecology*. 1 mars 2020. Vol. 147, pp. 103356. DOI 10.1016/j.apsoil.2019.09.006.

PEUGEOT, Juliette, 2020-2021, Étude de l'activité biologique de dégradation de la matière organique du sol en verger et verger-maraîcher, 35 pages, mémoire de fin d'études, Clermont-Ferrand, 2021.

STRUCTURE D'ACCUEIL ET INSTITUTIONS ASSOCIEES:

- L'Institut Agro – AgroCampus Ouest - Angers
- Institut de recherche en Horticulture et Semences (IRHS)

ENCADRANTS :

- Maîtres de stage : Cannavo, Patrice (AgroCampus Ouest – Angers)
Guillermin, Pascale (AgroCampus Ouest – Angers, IRHS)
- Tuteur pédagogique : Marliac, Gaëlle

OPTION : Concevoir et Accompagner l'Innov' Action en agronomie

RÉSUMÉ

Les vergers-maraîchers (VM) associent des arbres fruitiers et des cultures légumières. Les processus biologiques du sol, en particulier les cycles de la matière organique dans ces systèmes sont complexes et peu maîtrisés. Le travail présenté ici a consisté à étudier l'activité biologique de dégradation de la matière organique dans les sols d'un verger-maraîcher et d'un verger en production intégrée (INRAE - GisFruit), situés dans le Maine-et-Loire (France). Le VM est constitué de deux rangs de pommiers âgés de 20 ans, séparés par 5 planches légumières. Le verger INRAE est constitué de 3 rangs de pommiers âgés de 5 ans et présente deux modalités de fertilisation azotée : une fertilisation azotée foliaire et un amendement organique au sol (modalité azotée) et une fertilisation foliaire seulement (modalité carencée). Sur ces deux parcelles, les effets de la présence et de la distance aux arbres, de la couverture du sol et de la fertilisation azotée sur l'activité biologique du sol ont été évalués. Quatre variables témoins de l'activité biologique de dégradation de la matière organique ont été étudiées : la teneur en carbone et azote organiques du sol (CN), la respiration potentielle basale (BAS) et induite par le glucose (SIR) en conditions contrôlées, la respiration du sol et la minéralisation de l'azote *in situ* (Rs et Nmin). Pour le VM, CN, BAS et SIR étaient plus élevées à proximité des arbres alors qu'elles étaient inférieures à l'inter-rang pour l'INRAE. Sur les deux parcelles, Rs était plus faible sous les arbres et Nmin n'était pas différent entre les modalités. La fertilisation azotée a favorisé la respiration *in situ* par rapport à la modalité carencée.

Mots-clés : Verger-maraîcher, Verger, Activité biologique du sol, Matière organique, Minéralisation, Respiration du sol, Azote, Carbone

ABSTRACT

Garden Orchards (GO) combine fruit trees and vegetable crops. The biological processes involved in these systems, particularly the organic matter cycles, are complex and remain poorly understood. This study consisted in assessing the biological activity of organic matter degradation in the soils of a vegetable orchard and an integrated production orchard (INRAE - GisFruit), located in Maine-et-Loire (France). The GO consists of two rows of 20-year-old apple trees, separated by five vegetable beds. The INRAE orchard consists of three rows of 5-year-old apple trees and has two nitrogen fertilization modalities: foliar nitrogen fertilization associated with an organic soil amendment (nitrogen modality) and foliar fertilization only (deficient modality). In both plots, the effects of presence and distance to trees, soil cover and nitrogen fertilization on soil biological activity were evaluated. Four variables indicating biological activity of organic matter degradation were studied: soil organic carbon and nitrogen content (CN), basal (BAS) and glucose-induced potential respiration (SIR) under controlled conditions, *in situ* soil respiration (Rs) and nitrogen mineralization (Nmin). For GO, CN, BAS and SIR were higher near trees while they were lower at the inter-row for INRAE. In both plots, Rs was lower under the trees and Nmin was not different between modalities. Nitrogen fertilization favored *in situ* respiration compared to the deficient modality.

Key-words : Garden-Orchard, Orchard, Soil biological activity, Organic matter, Mineralization, Soil respiration, Nitrogen, Carbon