



Projet PROVEG Appel à projet PLAN REGIONAL DES PROTEINES VEGETALES DESTINEES A

Wassila Riah-Anglet

► To cite this version:

Wassila Riah-Anglet. Projet PROVEG Appel à projet PLAN REGIONAL DES PROTEINES VEGETALES DESTINEES A. Unilasalle Rouen. 2022. <hal-04573306>

HAL Id: hal-04573306

<https://hal.science/hal-04573306v1>

Submitted on 13 May 2024

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.



HAL Authorization



Projet PROVEG

Appel à projet

PLAN REGIONAL DES PROTEINES VEGETALES DESTINEES A
L'ALIMENTATION HUMAINE

Protéines Végétales

Evaluation de la durabilité de cultures mineures,
riches en protéines, en région Normandie



Unité AGHYLE-UP2018.C101
UNILASALLE-ROUEN

Contact: Wassila Riah-Anglet

Chargée de recherche en écologie microbienne, Biodiversité et Fonctions des sols – Unité de recherche AGHYLE, UP 2018.C101 ; Email : wassila.riah-anglet@unilasalle.fr; Phone: 33+ 2 32 82 91 98



Table des matières

1. Introduction.....	8
2. Contexte du projet.....	8
3. Objectif du projet.....	9
4. Les actions du projet PROVEG	10
4.1. Action 1 : Etat initial des sols & Performance des cultures.....	11
4.1.1. Etat initial des sols	11
4.1.1.1. Etude au champ : sites expérimentaux & stratégie d'échantillonnage	11
4.1.1.2. Etude au champ : parcelles agriculteurs & stratégie d'échantillonnage.....	13
4.1.1.3. Paramètres physicochimiques et biologiques mesurés sur les échantillons de sols	16
4.1.1.4. Construction des bases de données	17
4.1.1.4.1. Base de données - Microparcelles.....	17
4.1.1.4.2. Base de données - Parcelles agriculteurs	18
4.1.1.5. Analyses statistiques des données	19
4.1.1.5.1. Analyses multivariées	19
4.1.1.5.2. Analyses des corrélations 2 à 2	19
4.1.1.5.3. Analyses univariées	19
4.1.2. Evaluation multicritère des systèmes de culture	19
4.2. Action 2 : Potentiel de développement des cultures de légumineuses en région Normandie	21
4.2.1. Modélisation de la performance des cultures	21
4.2.2. Qualité sanitaire des cultures	22
4.2.2.1. Détermination du potentiel infectieux d' <i>Aphanomyces euteiches</i> dans les sols	22
4.2.2.2. Intérêt des cultures de légumineuses en association	23
5. Résultats.....	24
5.1. Action 1 : Etat initial des sols étudiés & performance des cultures.....	24
5.1.1. Etat initial des sols étudiés.....	24
5.1.1.1. Texture, teneur en calcaire et qualité structurale des sols étudiés	24
5.1.1.2. Représentativité des indicateurs mesurés dans le référentiel de sols de grande culture au niveau national	27
5.1.1.3. Etude de la variabilité spatiale des indicateurs bio-physicochimiques mesurés	28
5.1.1.4. Variabilité temporelle des variables mesurées	29
5.1.2. Effet de l'implantation des cultures riches en protéines (légumineuses)	32
5.1.2.1. En microparcelles	32

5.1.2.2.	En parcelles agriculteurs.....	34
5.1.3.	Performance des cultures étudiées dans un contexte Normand.....	38
5.1.3.1.	En microparcelles	38
5.1.3.2.	En parcelles agriculteurs.....	39
5.1.4.	Relation entre l'état du sol et la performance des cultures.....	41
5.1.5.	Evaluation de la durabilité des systèmes de culture incluant une légumineuse mis en place chez les agriculteurs.....	42
5.1.5.1.	Concernant la dimension économique.....	44
5.1.5.2.	Concernant la dimension sociale.....	44
5.1.5.3.	Concernant la dimension environnementale	44
5.2.	Action 2 : Potentiel de développement des cultures de légumineuses en région Normandie.....	45
5.2.1.	Modélisation et évaluation des critères de performance des cultures.....	45
5.2.2.	Qualité sanitaire des cultures	47
5.2.2.1.	Détermination du potentiel infectieux d' <i>Aphanomyces euteiches</i> dans les sols	47
5.2.2.2.	Intérêt des cultures de légumineuses en association.....	49
5.2.2.2.1.	Caractérisation de la composition des exsudats de pois et de féverole par analyse RMN.....	49
5.2.2.2.2.	Caractérisation du RET par imagerie cellulaire chez les légumineuses sélectionnées.....	51
5.2.2.2.2.1.	Infection racinaire précoce par <i>A. euteiches</i>	52
5.2.2.2.2.2.	Élongation racinaire des différentes plantes.....	53
5.2.2.2.2.3.	Observation du RET	53
5.2.2.2.2.4.	Caractérisation du RET par imagerie cellulaire.....	55
5.2.2.2.3.	Analyse des AGPs par approche biochimique	57
5.3.	Action 3 : Communication, transfert des connaissances et livrables.....	58
6.	Conclusions et perspectives	60
	Bibliographie	63

Table des tableaux

Tableau 1 : Caractéristiques de 5 espèces végétales à fort potentiel protéique pour la région Normandie.....	9
Tableau 2 : Description des itinéraires techniques mis en place un an avant l'implantation des légumineuses dans les deux départements de l'Eure et la Seine Maritime	11
Tableau 3 : Description des itinéraires techniques mis en place un an avant l'implantation des cultures concernées chez le réseau d'agriculteurs PROVEG.....	14
Tableau 4 : Paramètres physicochimiques mesurés dans les échantillons de sols dans le cadre du projet PROVEG.....	16
Tableau 5 : Paramètres biologiques mesurés sur les échantillons de sols dans le cadre du projet PROVEG	17
Tableau 6 : Synthèse des données d'ITK renseignées par les agriculteurs	18
Tableau 7 : Positionnement dans un référentiel national de la valeur de chaque indicateur mesuré en microparcelles.	28
Tableau 8 : Effet date de prélèvement du sol sur chaque variable physico-chimique et microbiologique mesurée. Pour les microparcelles, l'effet date est étudié par culture et par pédoclimat et pour les parcelles agriculteurs par culture et par mode de travail du sol.	31
Tableau 9 : Profils de durabilité obtenus avec l'outil Masc 2.0. Plus la couleur est verte, plus le système de culture est durable sur le critère considéré et inversement plus la couleur est rouge et moins le système de culture est durable sur ce critère	43
Tableau 10 : Moyenne des mesures des longueurs de racines (en centimètres) après germination des graines, et leur écart-type	53
Tableau 11 : Résumé des résultats obtenus pour la détection des épitopes associés aux glycomolécules pariétales dans le RET des variétés de pois Lapony, Astronaute et de la féverole.	56
Tableau 12 : Bilan des actions de communications menées dans le cadre du projet PROVEG	59

Table des figures

Figure 1 : Les cultures concernées par le projet PROVEG.....	10
Figure 2 : Schéma synthétique des actions et tâches qui structurent le projet PROVEG.....	10
Figure 3 : Dispositif expérimental mis en place par Natup dans le cadre du projet PROVEG. a) Stratégie d'échantillonnage, b) photos du dispositif en Seine Maritime	13
Figure 4 : Représentation cartographique de la répartition des cultures dans les parcelles des 21 agriculteurs Normands	15
Figure 5 : Illustration des campagnes d'échantillonnage réalisées chez les agriculteurs identifiés par Cerfrance dans le cadre du projet PROVEG. a) Stratégie d'échantillonnage, b) photos de quelques parcelles agriculteurs	16
Figure 6 : Présentation des pondérations utilisées pour l'agrégation au fur et à mesure des critères de chacune des composantes tels que paramétrés dans Masc 2.0	20
Figure 7 : Schéma général de la méthodologie suivie pour estimer le potentiel de production territorial de légumineuses en région Normandie.....	21
Figure 8 : Règles d'insertion des légumineuses dans les rotations normandes	22
Figure 9 : Détermination du potentiel infectieux d'Aphanomyces euteiches dans les sols	23
Figure 10 : Composition du RET et effets sur les micro-organismes de la rhizosphère (Driouich et al., 2013). RC : Root Cap ; BC : Border cells. Le RET permet d'inhiber (-) les effets des	

différents pathogènes tout en favorisant (+) une interaction avec les bactéries bénéfiques du sol.	24
Figure 11 : Détermination des classes de textures et du taux d'argile des sols des microparcelles. (A) représentation des sols pour chaque cultures sur le triangle des textures GEPPA. (B) Boxplots de la teneur en argile (%) des sols pour chaque culture dans l'Eure et la Seine Maritime. Les tests statistiques ont été réalisés avec le package « nparcomp » de RStudio	25
Figure 12 : Représentation des sols calcaires par texture et détermination du taux de calcaire des sols des microparcelles. (A) représentation des sols calcaires pour chaque culture sur le triangle des textures GEPPA. (B) Boxplots de la teneur en calcaire (%) des sols pour chaque culture dans l'Eure et la Seine Maritime. Les tests statistiques ont été réalisés avec le package « nparcomp » de RStudio	25
Figure 13 : Qualité structurale des sols des microparcelles dans l'Eure et la seine Maritime. Boxplots représentant la variation du ratio MO / Argile (%). Les tests statistiques ont été réalisés avec le package « nparcomp » de RStudio	26
Figure 14 : Représentation des sols des parcelles agriculteurs en labours et en non-labour. (A) représentation des sols pour chaque cultures sur le triangle des textures GEPPA. (B) représentation des sols calcaires pour chaque cultures sur le triangle des textures GEPPA..	26
Figure 15 : Qualité structurale des sols des microparcelles dans l'Eure et la Seine Maritime. Boxplots représentant la variation du ratio MO / Argile (%). Les tests statistiques ont été réalisés avec le package « nparcomp » de RStudio	27
Figure 16 : Boxplots du coefficient de variation (%) pour les variables physico-chimiques (A) et microbiologiques (B).	29
Figure 17 : Variabilité temporelle des variables mesurées dans les sols en microparcelles en en parcelles agriculteurs	30
Figure 18 : Effet de la classe de texture du sol et du mode de travail du sol sur chaque variable physico-chimique et microbiologique mesurée en microparcelles et parcelles agriculteurs.	31
Figure 19 : Effet de l'implantation des légumineuses sur C organique, le niveau des activités et le profil enzymatiques dans les sols des microparcelles dans l'Eure et dans la Seine-Maritime	32
Figure 20 : Effet de l'implantation des légumineuses sur l'azote minéral et les biomasses (totale, bactérienne et fongique) et le ratio F/B dans les sols des microparcelles dans l'Eure et dans la Seine-Maritime	33
Figure 21 : Effet de l'implantation des légumineuses sur le niveau et le profil de la diversité fonctionnelle potentielles dans les sols des microparcelles dans l'Eure et dans la Seine maritime	34
Figure 22 : Effet de l'implantation des légumineuses et du quinoa sur C organique, P Olsen, les biomasses (Total te bactérienne), l'arylamidase et le C labile dans les sols des parcelles agriculteurs en labour et non labour	35
Figure 23 : Effet de l'implantation des légumineuses du quinoa sur la biomasse fongique, le ratio F/B et le profil enzymatique dans les sols des parcelles agriculteurs en labour et non labour	36
Figure 24 : Effet de l'implantation des cultures riches en protéines sur l'activité symbiotiques dans les sols des microparcelles dans l'Eure et la Seine Maritime et dans les parcelles agriculteurs en labour et non labour	37
Figure 25 : Classification ascendante hiérarchique pour tester l'effet type de culture dans les sols des microparcelles dans la Seine Maritime et dans les parcelles agriculteurs en labour	38

Figure 26 : Rendement réalisé dans chaque pédoclimat et pour chaque culture de légumineuses en microparcelles.....	39
Figure 27 : Rendement réalisé par parcelle agricole en 2021. Les couleurs se rapportent au niveau de qualité de la récolte.....	40
Figure 28 : Pratiques culturales étudiées sur les 19 parcelles agricoles avec rendement renseigné l'année du prélèvement. Ces pratiques ont été étudiées en analysant leur impact potentiel sur le rendement réalisé.....	40
Figure 29 : Analyse des Correspondances Multiples (ACM) sur les pratiques culturales de 19 parcelles agricoles (avec rendement année n renseigné). Les pratiques culturales prises en compte sont celles de l'année du prélèvement (culture en place, fertilisations organique et minérale, IFT total et couverts intermédiaires) et de l'année n-1 (culture en place et gestion des résidus). Les rendements indiqués dans les encadrés en pointillés sont ceux de l'année du prélèvement.	41
Figure 30 : A) Matrice des corrélations de Spearman sur les données des 3 campagnes de prélèvement, en microparcelles et parcelles agriculteurs (n = 129 observations). B) Matrice des corrélations de Spearman sur les données de la deuxième campagne (au cours de la culture).	42
Figure 31 : Variabilité du rendement A) sur 6 lieux, 5 types de sols en pois de printemps simulés avec le modèle STICS avec les années climatiques entre 2010 et 2020. B) variabilité du rendement sur 9 lieux, 5 types de sols en féverole de printemps simulés avec le modèle STICS avec les années climatiques entre 2010 et 2020	45
Figure 32 : Surface agricole utile par département Normand qui pourrait être utilisée pour la culture du pois et de la féverole de printemps.....	46
Figure 33 : Volume (Tonnes) de production par département en tenant en compte uniquement comme critère d'exclusion les sols non aptes à la culture de ces deux légumineuses.....	46
Figure 34 : Surface (ha) utilisable pour l'introduction de pois ou féverole en fonction des règles d'insertion dans les rotation présentes dans la région, par département.	47
Figure 35 : Localisation des parcelles susceptibles d'accueillir une légumineuse et pourcentage par département.	47
Figure 36 : Quantification du nombre de génome d'Aphanomyces euteiches dans les sols de pois et de lentille en microparcelles	48
Figure 37 : Quantification du nombre de génome d'Aphanomyces euteiches dans les sols de pois et de lentille en parcelles agriculteurs	48
Figure 38 : Schéma illustrant la mise au point de la technique de cultures des plantes et de récolte des exsudats de pois et de féverole en vue de l'analyse des métabolites par RMN. .	49
Figure 39 : Profils d'exsudation obtenus après analyse RMN pour des cultures de pois et de féverole en hydroponie.....	50
Figure 40 : Analyse statistique multivariée – Analyse en Composante Principale (ACP) des profils d'exsudation obtenus après analyse RMN pour des cultures de pois et de féverole en hydroponie.	51
Figure 41 : Semis réalisés sur papier Whatman et sur gélose pour l'observation du RET pour les différentes légumineuses, pois, féverole, lentille.....	51
Figure 42 : Mise en évidence de l'infection par A. euteiches dans les différents compartiments racinaires (coiffe, zone d'élongation ZE ; zone de maturation ZM) par coloration au WGA-FITC et observation par microscopie à épifluorescence. La présence de fluorescence témoigne de la présence de mycélium ou de spores d'A. euteiches.	52

Figure 43 : Croissance racinaire (A) Pois de printemps (variété Astronaute) ; (B) Pois d'hiver (variété Lapony) ; (C) Féverole (variété Fanfare). Pour la féverole, les mesures de longueur racinaire ne peuvent être effectuées qu'après le cinquième jour.	54
Figure 44 : Cinétique représentant l'évolution du volume de RET jusqu'à 17 jours de croissance. (A) Pois de printemps (variété Astronaute) ; (B) Pois d'hiver (variété Lapony) ; (1) volume rapporté à la surface racinaire ; (2) Surface du RET sur surface totale.	54
Figure 45 : Observation d'apex racinaires de plantules saines après coloration à l'encre de Chine. (A) Pois de printemps (variété Astronaute) ; (B) Pois d'hiver (variété Lapony) ; (C) Féverole (variété Fanfare) ; (D) Fenugrec. Les apex sont colorés à l'encre de Chine pour mettre en évidence le mucilage et le RET par coloration négative sous forme de halo blanc autour de la racine (indiqué par une flèche).	55
Figure 46 : Observations à plus forts grossissements du RET après coloration à l'encre de Chine. (A) Pois de printemps (variété Astronaute) ; (B) Pois d'hiver (variété Lapony) ; (C) Féverole (variété Fanfare).	55
Figure 47 : Immunodétection des épitopes associés aux AGPs reconnus par l'anticorps LM2 à la surface des cellules bordantes de pois de la variété Lapony et observation en microscopie confocale à balayage laser.	57
Figure 48 : Mise en évidence des AGPs dans les cellules bordantes de racine de pois et de féverole après infection avec <i>A. euteiches</i> et observation en microscopie en lumière transmise. La présence de vésicules dans le cytoplasme des cellules est indiquée par les flèches noires.	57
Figure 49 : Analyse semi-quantitative des AGPs présentes dans les exsudats des plantules de pois (Astronaute et Lapony) et féverole (Fanfare). (A) gel de diffusion radiale. (B), quantité d'AGPs détectée dans les exsudats racinaires des 3 plantules exprimées en g/g d'exsudats.	58
Figure 50 : Présentation du save the date qui a servi à l'annonce de la journée de restitution des résultats du projet PROVEG.	59
Figure 51 : : Exemple de fiches agriculteurs qui a servi à la restitution des résultats du projet PROVEG aux agriculteurs.	60
Figure 52 : Organisation de la phase 2 du projet PROVEG, présentation des différentes actions ainsi que les partenaires impliqués dans le projet.	62

1. Introduction

L'agriculture est aujourd'hui confrontée à de nouveaux enjeux agronomiques, environnementaux et économiques. Le développement des approches agroécologiques et de la bioéconomie sont autant de réponses qui invitent à repenser les systèmes de culture à la fois dans la diversité des plantes cultivées, les itinéraires techniques et les formes d'agriculture pour permettre une production suffisante de matières premières de qualité tout en contribuant à la préservation voire la restauration de l'environnement.

En parallèle, l'Europe et la France souffrent d'une forte dépendance aux importations de protéines en raison d'un déficit de la production de protéines végétales. En effet, l'Union européenne importe près de 90% de ses besoins en protéines végétales, la France est dans une moindre dépendance, elle importe autour de 50% de ses besoins. Cependant, la situation se dégrade au fil du temps car les surfaces françaises consacrées aux cultures riches en protéines sont en déclin depuis le début des années 2000 (Schneider and Huyghe, 2015). Pour répondre à ces enjeux, les plans protéines végétales pour la France (2014 – 2020, puis 2020-2022) visent à promouvoir et accompagner la culture de plantes à haut potentiel protéique. La Région Normandie a pour ambition de se positionner en territoire de référence pour la production et la valorisation des protéines végétales, en particulier les protéines végétales à destination de l'alimentation humaine.

En raison de leur teneur en protéines, plusieurs types de plantes présentent des atouts pour l'alimentation humaine, notamment les légumineuses, les céréales et les oléagineux. Le rôle des légumineuses dans la nutrition a été reconnu comme une source pertinente de protéines ainsi que pour d'autres avantages pour la santé. Le soja, l'arachide, le haricot, le pois, le lupin, le pois chiche, la fève, la féverole, la lentille, ... sont actuellement les légumineuses les plus importantes pour l'alimentation humaine (Ron, 2015). L'augmentation de la part des légumineuses dans les surfaces cultivées pourrait réduire le déficit actuel en protéines et contribuer à la transition vers des systèmes agricoles plus durables. En effet, les légumineuses contribuent à l'amélioration durable de l'environnement en raison de leur capacité à fixer l'azote et leurs effets bénéfiques sur le sol (Coba de la Pena and Pueyo, 2012; Drevon et al., 2015; Aschi et al., 2017; Rezgui et al., 2020; Ferreira et al., 2021; Kanté et al., 2021). D'autres cultures telles que les oléagineux sont cultivés spécifiquement pour leurs graines ou leurs fruits riches en matières grasses. En effet, les graines oléagineuses de tournesol, de lin, de colza, de sésame, de courge, de pignon, de pin, ... sont riches en acides gras insaturés nécessaires à l'organisme. Les céréales tels que le riz, le blé, l'épeautre, l'avoine, l'orge, le maïs, ... et certaines cultures mineures, telles que le chanvre, l'amarante, le quinoa, le sarrasin et le chia sont reconnus comme d'excellentes sources de protéines et leurs graines contiennent notamment la lysine, un acide aminé essentiel, peu présent dans les céréales. Les évaluations nutritionnelles du quinoa indiquent par exemple qu'il constitue une source de protéines complètes avec un bon équilibre de tous les acides aminés nécessaires au régime alimentaire humain, ainsi que d'importants minéraux, vitamines, huiles de haute qualité et flavonoïdes. Cette culture maintient une productivité importante dans les sols pauvres et dans des conditions de stress hydrique et de salinité élevée (Choukr-Allah et al., 2016).

2. Contexte du projet

La production végétale en Normandie est hautement spécialisée et repose actuellement sur un nombre restreint de cultures, ce qui soulève des questions sur la durabilité de l'agriculture (Tilman et al., 2002) et tout particulièrement dans le contexte actuel sur l'autonomie en protéine. Dans le même temps, les valorisations des ressources protéiques en Normandie sont très restreintes. Ces ressources

sont souvent exportées sans qu'aucune valorisation économique ne soit effectuée. Cependant, lorsque des valorisations sont faites, elles sont principalement limitées aux produits peu concentrés en protéines à destination de l'alimentation animale. Ainsi, le développement de nouvelles cultures pourrait permettre de répondre à l'ensemble de ces enjeux de diversification des rotations et augmentation de la part de protéines végétales. Par ailleurs, face aux questions d'augmentation du coût des intrants, de plafonnement des rendements, ou de production de protéines locales, le développement de cultures variées de protéagineux s'impose afin de proposer des solutions concrètes face aux enjeux de la durabilité agronomique, de l'amélioration des bilans environnementaux et du renforcement de l'autonomie protéique régionale. Dans le contexte actuel, l'introduction de certaines cultures riches en protéines pourrait permettre une amélioration de 11 à 26% des revenus pour les exploitations agricoles (Ferreira et al. 2020).

Les cultures répertoriées dans le tableau 1 présentent un potentiel fort pour répondre aux différents enjeux de la durabilité agronomique, de l'amélioration des bilans environnementaux et du renforcement de l'autonomie protéique.

Tableau 1 : Caractéristiques de 5 espèces végétales à fort potentiel protéique pour la région Normandie

Plante	Type	Intérêt nutritionnel (teneur protéines en %)	Pathogènes	Stress abiotiques
Quinoa (<i>Chenopodium quinoa</i>)	<i>Amaranthaceae</i>	-12 à 23% -Riche en acides aminés : lysine, méthionine (Dakhili et al., 2019)	-Champignons (Mildiou, Fusarium, Phytium) -Bactéries (<i>Rhizoctonia Solani</i>) -Nématodes (<i>Globodera pallida</i>) (Gandarillas et al., 2015)	Résistance aux stress hydrique et salin (Dakhili et al., 2019)
Lupin (<i>Lupinus angustifolius</i>)	<i>Fabaceae</i>	-30 à 40% -Protéine majeure : conglutine (propriétés nutritionnelles et pharmaceutiques : -Teneur faible en amidon par rapport aux autres légumineuses (Lee et al., 2006; Lima-Cabello et al., 2018)	Champignon (anthracnose : <i>Colletotrichum lupini</i>) -Oomycète (Phytophthora) -Bactéries (Sclerotinia, Rhizoctonia) (Jimenez-Lopez et al., 2016; Talhinhos et al., 2016)	Espèce pionnière (système racinaire profond, stabilisation des dunes) (Gladstones, 1998)
Lentilles (<i>Lens culinaris</i>)	<i>Fabaceae</i>	-26% -Peptides bioactifs, composés anti-microbiens (Khazaei et al., 2019)	-Champignon (<i>Stemphylium botryosum</i>) -Oomycète (<i>Aphanomyces euteiches</i> : sensibilité élevée) (Bazghaleh et al., 2018; Cao et al., 2019)	Résistance aux stress hydrique, salin, refroidissement ((Stoddard et al., 2006; Idrissi et al., 2013)
Pois (<i>Pisum sativum</i>)	<i>Fabaceae</i>	-25% -Globuline, albumine, gluteline ; riche en lysine (Quillévéré-Hamard et al., 2018)	-Oomycète (<i>Aphanomyces euteiches</i> : sensibilité élevée) (Quillévéré-Hamard et al., 2018)	Résistance à différents stress (sécheresse, chaleur, gel, refroidissement, salinité) (Stoddard et al., 2006)
Féverole (<i>Vicia faba</i> L.)	<i>Fabaceae</i>	-25 à 40% -Riche en lysine (Lepse et al., 2017)	-Oomycète (<i>Aphanomyces euteiches</i> : sensibilité faible)	Résistance à différents stress (sécheresse, chaleur et gel) (Stoddard et al., 2006)

3. Objectif du projet

Le projet PROVEG ambitionne d'évaluer l'intérêt de 5 cultures de printemps susceptibles de pouvoir accroître la production de protéines végétales, à finalité d'alimentation humaine, au sein des systèmes de culture normands. Afin de diversifier les cultures de protéagineux, d'allonger les rotations et de

réduire les pesticides, le projet PROVEG s'est intéressé au potentiel de 4 cultures de légumineuses de printemps : Pois, Féverole, Lupin et Lentille ainsi que celui d'une "pseudo-céréale" à fort potentiel nutritionnel : le Quinoa (**Figure 1**).

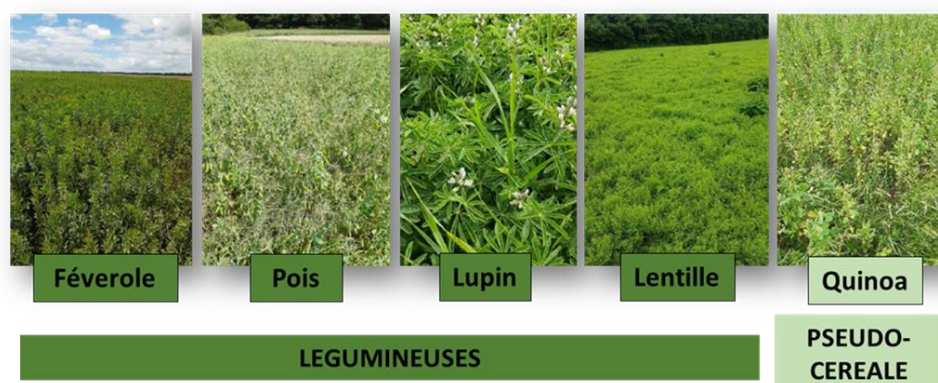


Figure 1 : Les cultures concernées par le projet PROVEG

4. Les actions du projet PROVEG

La recherche d'itinéraires techniques adaptés à ces cinq cultures à fort potentiel protéique dans le contexte pédoclimatique normand va permettre de positionner leur production en Normandie. Il est important cependant de prendre en compte les différents aspects relatifs à la mise en place de ces cultures. En effet, une diversité de facteurs est susceptible d'affecter la capacité de ces cultures à se développer durablement dans les agrosystèmes normands : les conditions climatiques, l'état biologique des sols, la vulnérabilité des cultures, l'utilisation de leurs ressources protéiques dans l'alimentation humaine, leurs avantages pour la santé et les contraintes socio-économiques ou environnementales liées à leur développement, doivent être considérés dans une approche systémique pour envisager le développement de filières durables des protéines végétales du futur. Ainsi le projet PROVEG s'articule autour de 3 actions complémentaires. La **Figure 2** présente le détail de ces actions.

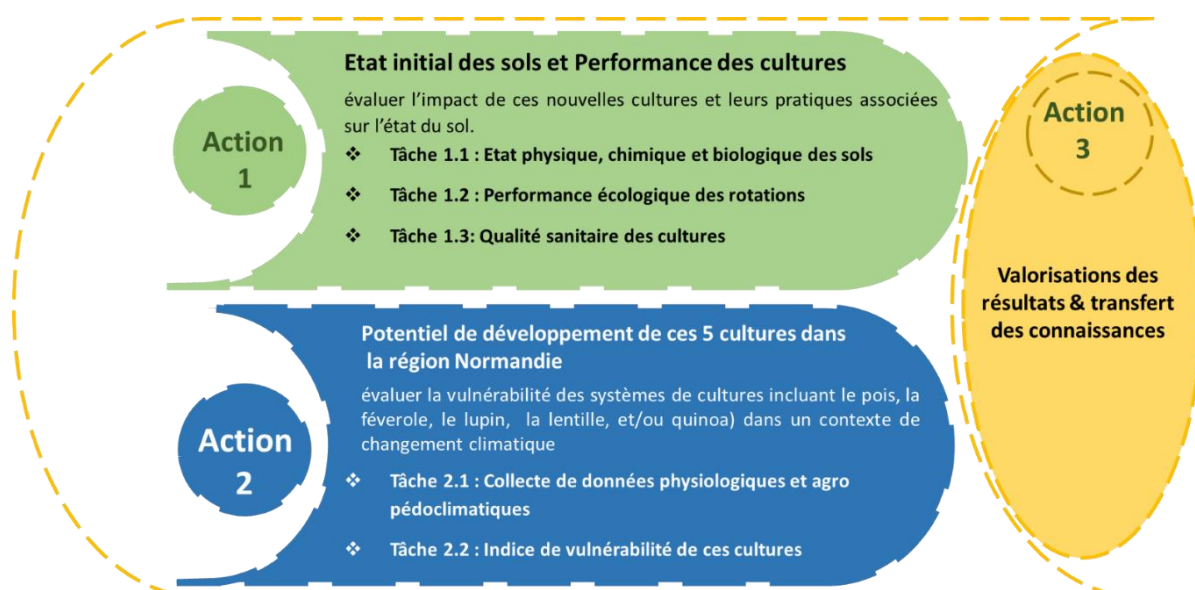


Figure 2 : Schéma synthétique des actions et tâches qui structurent le projet PROVEG

4.1. *Action 1 : Etat initial des sols & Performance des cultures*

4.1.1. *Etat initial des sols*

L'étude de l'état du sol *via* une caractérisation biophysicochimique a été menée afin (1) d'évaluer l'état souhaitable du sol permettant la mise en place de ces cultures et (2) d'évaluer l'impact de ces nouvelles cultures et leurs pratiques associées sur l'état du sol. Cette étude a été menée au champ sur deux dispositifs expérimentaux.

4.1.1.1. Etude au champ : sites expérimentaux & stratégie d'échantillonnage

Les sites expérimentaux étudiés ont été mis en place et gérés par la coopérative Natup, partenaire du projet. Les deux sites expérimentaux sont localisés dans deux pédoclimats différents : l'Eure et la Seine-Maritime. Ce sont des essais randomisés en bandes d'environ 1.5 x 10 m. Chaque site expérimental comprend les 4 cultures de légumineuses étudiées (Pois lentilles, fèverole et lupin) avec trois bandes (répétitions) par culture. Le quinoa n'a pas pu être étudié sur les micro-parcelles pour des raisons d'indisponibilité des graines pour le semis. Le **Tableau 2** présente les itinéraires techniques de l'année n-1 avant l'implantation des cultures.

Le suivi des cultures a consisté dans la réalisation de 3 campagnes d'échantillonnage afin de pouvoir étudier l'état du sol avant implantation des cultures, pendant leur cycle de développement et après récolte. Ainsi, sur l'ensemble des deux sites expérimentaux, 24 échantillons ont été prélevés à chaque campagne d'échantillonnage, cela correspond à 72 échantillons au total sur les 3 dates (mars 2021, juillet 2021, octobre /novembre 2021).

Tableau 2 : Description des itinéraires techniques mis en place un an avant l'implantation des légumineuses dans les deux départements de l'Eure et la Seine Maritime

Département	Culture en place	Précédent culturel (en place en 2019)	Rendement récolte culture principale (t/ha ou t MS/ha) aux normes	Quantité de résidus (t MS /ha)	Devenir résidus	Profondeur incorporation résidus (cm)	Mode de travail du sol	Profondeur travail du sol (cm)	Type outil travail du sol	Type couverts intermédiaires : Composition (espèces présentes ou a minima famille)	Fertilisation N minéral (kg/a)
Eure	Lupin	blé tendre d'hiver	8,5	3	broyées enfouies	15-20	déchaumage	10	Déchaumeur	Moutarde	-
Eure	Lupin	blé tendre d'hiver	8,5	3	broyées enfouies	15-20	déchaumage	10	Déchaumeur	Moutarde	-
Eure	Lupin	blé tendre d'hiver	8,5	3	broyées enfouies	15-20	déchaumage	10	Déchaumeur	Moutarde	-
Eure	Lentille	blé tendre d'hiver	8,5	3	broyées enfouies	15-20	déchaumage	10	Déchaumeur	Moutarde	-
Eure	Lentille	blé tendre d'hiver	8,5	3	broyées enfouies	15-20	déchaumage	10	Déchaumeur	Moutarde	-
Eure	Lentille	blé tendre d'hiver	8,5	3	broyées enfouies	15-20	déchaumage	10	Déchaumeur	Moutarde	-
Eure	Pois	blé tendre d'hiver	8,5	3	broyées enfouies	15-20	déchaumage	10	Déchaumeur	Moutarde	-
Eure	Pois	blé tendre d'hiver	8,5	3	broyées enfouies	15-20	déchaumage	10	Déchaumeur	Moutarde	-
Eure	Pois	blé tendre d'hiver	8,5	3	broyées enfouies	15-20	déchaumage	10	Déchaumeur	Moutarde	-
Eure	Féverole	blé tendre d'hiver	8,5	3	broyées enfouies	15-20	déchaumage	10	Déchaumeur	Moutarde	-
Eure	Féverole	blé tendre d'hiver	8,5	3	broyées enfouies	15-20	déchaumage	10	Déchaumeur	Moutarde	-
Eure	Féverole	blé tendre d'hiver	8,5	3	broyées enfouies	15-20	déchaumage	10	Déchaumeur	Moutarde	-
Seine-Maritime	Lupin	lin textile	6	0	exportées	0					
Seine-Maritime	Lupin	lin textile	6	0	exportées	0					
Seine-Maritime	Lupin	lin textile	6	0	exportées	0					
Seine-Maritime	Lentille	blé tendre d'hiver	8	4,2	exportées	0	déchaumage	10	Déchaumeur	blé sur blé	180
Seine-Maritime	Lentille	blé tendre d'hiver	8	4,2	exportées	0	déchaumage	10	Déchaumeur	blé sur blé	180
Seine-Maritime	Lentille	blé tendre d'hiver	8	4,2	exportées	0	déchaumage	10	Déchaumeur	blé sur blé	180
Seine-Maritime	Pois	lin textile	6	0	exportées	0					
Seine-Maritime	Pois	lin textile	6	0	exportées	0					
Seine-Maritime	Pois	lin textile	6	0	exportées	0					
Seine-Maritime	Féverole	lin textile	6	0	exportées	0					
Seine-Maritime	Féverole	lin textile	6	0	exportées	0					
Seine-Maritime	Féverole	lin textile	6	0	exportées	0					

Concernant la stratégie d'échantillonnage, chaque échantillon de sol de chaque microparcelle (bande) correspond à un point composite de 5 points de prélèvement (**Figure 3**). Ce point est géoréférencé pour pouvoir réaliser l'échantillonnage au même endroit à chaque fois. Le sol a été prélevé sur une profondeur de 0-20 cm à l'aide d'une tarière.

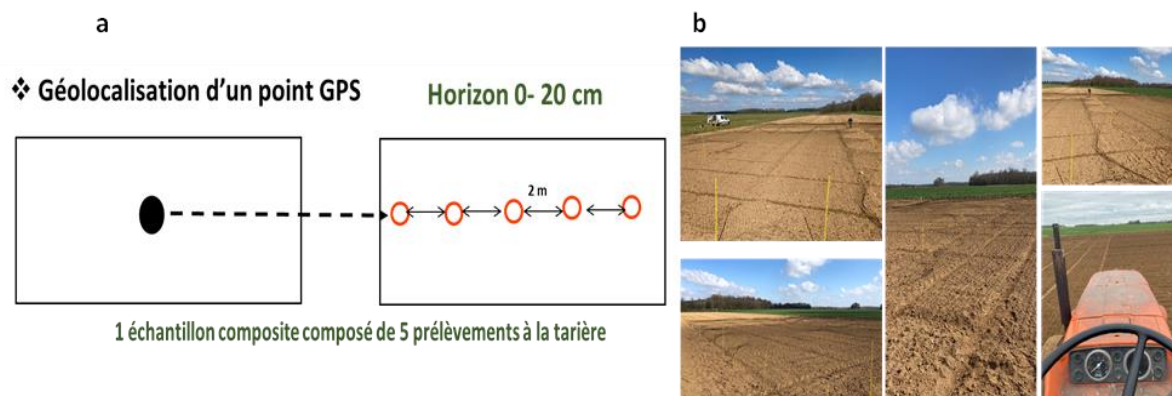


Figure 3 : Dispositif expérimental mis en place par Natup dans le cadre du projet PROVEG. a) Stratégie d'échantillonnage, b) photos du dispositif en Seine Maritime

Le projet Vivepois, financé par la région Normandie, a permis de mettre en évidence des effets de l'introduction de pois d'hiver dans les rotations de culture sur l'état du sol, notamment sur les communautés microbiennes du sol, les fonctions associées et les flux d'azote résultants (Rezgui et al. 2020 ; Rezgui et al. 2021). Il s'agit ici de suivre les cultures concernées en conditions au champ chez les agriculteurs. Afin d'identifier l'état souhaitable à l'implantation des 4 cultures de légumineuses ainsi que le quinoa sous deux modes de travail du sol et dans des contextes de rotations culturales différentes.

4.1.1.2. Etude au champ : parcelles agriculteurs & stratégie d'échantillonnage

Cette tâche a impliqué la recherche d'agriculteurs pour la mise en place des cultures concernées dans leur exploitation. Ce travail laborieux a été conduit par Cerfrance avec un appui d'UnilaSalle. Plusieurs critères ont été pris en compte dans la recherche des parcelles agriculteurs. Pour chaque culture nous avons souhaité tester l'effet de deux modes du travail du sol : labour conventionnel et non labour (depuis minimum 5 ans avant le prélèvement). Aussi, afin de minimiser le poids des facteurs confondant lors de l'interprétations des données, les parcelles retenues devaient dans la mesure du possible avoir le même précédent cultural (céréale). Les 4 cultures de légumineuses et le quinoa ont été ainsi étudiées chez 22 agriculteurs, le projet incluait au total 3 répétitions (1 répétition par agriculteur) pour chaque culture de légumineuses et pour chaque mode de travail du sol. Concernant le quinoa, il a été possible de suivre cette culture que chez deux agriculteurs et avec un seul mode de travail du sol, le labour. Le **Tableau 3** présente les itinéraires techniques de l'année n-1 avant l'implantation des cultures chez les agriculteurs. les agriculteurs sont désignés par la lettre A dans ce tableau. L'ensemble des modalités étudiées couvrait les deux pédoclimats de l'Eure et la Seine maritime tel que représenté sur la **Figure 4**.

Tableau 3 : Description des itinéraires techniques mis en place un an avant l'implantation des cultures concernées chez le réseau d'agriculteurs PROVEG

Pratiques culturales- Année n-1 (2019 - 2020)																
Exploitant agricole	Culture en place	Type de travail du sol	Précédent cultural (en place en 2019)	Classe de couverts intermédiaires	Type destruction couverts	Classe biomasse couvert	Type d'effluents	Type de travail du sol	Valeur IFT total (année n-1)	Classe de niveau de l'IFT total (année n-1)	Fertilisation minérale	Rendement	Classe de rendement	Classe de qualité de la récolte	Type de gestion des résidus	
															Laissés ou exportés	Si résidus laissés : enfouis ou laissés en surface
A1	Pois	Labour	Blé	-	-	-	-	Labour	2,39	Faible	oui	75 qtx	Moyen à élevé		Exportés	-
A2	Pois	Labour	Orge	-	-	-	Fumier	Labour			oui	84.2 qtx/ha			Laissés	?
A3	Pois	Labour	Blé	-	-	-	-	Labour	2,75	Faible	oui	108 qtx	Très élevé	Bonne qualité	Exportés	-
A4	Pois	Non labour	Blé	Autres	-	-	-	Non labour	4,84	Moyen	oui	85 qtx	Très élevé	Bonne qualité	Laissés	?
A5	Pois	Non labour	Escourgeon	Légumineuse + autres	Destruction chimique	Biomasse faible	Fumier	Non labour	3	Faible	oui	72 qtx	Très élevé	Qualité moyenne	Exportés	-
A6	Pois	Non labour	Orge	-	-	-	Digestat	Non labour	3,22	Moyen	oui	102 qtx	Très élevé	Bonne qualité	Laissés	Enfouis
A7	Féverole	Labour	Blé	-	-	-	-	Labour	3,38	Moyen	oui	90 q/ha	Très élevé		Laissés	Enfouis
A8	Féverole	Labour	Blé	-	-	-	-	Labour	2,42	Faible	oui	70 qtx/ha	Moyen à élevé		Laissés	Enfouis
A9	Féverole	Labour	Blé					Labour	4	Moyen	oui	65 qtx	Moyen à élevé		Exportés	-
A10	Féverole	Non labour	Maïs	Autres	-	-	Ecomulch	Non labour	4,3	Moyen	oui	7.5T	Moyen à élevé		Laissés	Enfouis
A11	Féverole	Non labour	Maïs	Légumineuse + autres	Destruction chimique	Biomasse moyenne	Lisier + Fumier	Non labour	1,05	Faible	oui	107.1 T/ha	Moyen à élevé	Qualité moyenne	Laissés	?
A12	Féverole	Non labour	Blé	Autres	Destruction chimique	-	Bois Raméal Fragmenté	Non labour	3,2	Moyen	oui	76.005 qtx	Moyen à élevé	Bonne qualité		
A13	Lupin	Labour						Labour			oui					
A14	Lupin	Labour	Maïs (+ betterave)	-	-	-	Lisier	Labour	1	Faible	oui	10 T MS/ha	Faible à moyen	Qualité moyenne	Exportés	-
A15	Lupin	Non labour	Blé	-	-	-	-	Non labour	3,9	Moyen	oui	72 qtx	Moyen à élevé	Bonne qualité	Exportés	-
A16	Lupin	Non labour	betterave sucrière	?	Destruction chimique	Biomasse élevée	Fumier + Ecume sucrerie	Non labour	5,12	Elevé	oui	85,97 t/ha	Très élevé			
A17	Lentille	Labour						Labour			oui					
A18	Lentille	Labour	Blé				-	Labour	5,23	Elevé	oui	65 qtx	Très élevé			
A19	Lentille	Labour						Labour			oui					
A 20	Lentille	Non labour	Blé	-	-	-	-	Non labour	0	Nul	oui	6.8 t/ha	Moyen à élevé		Laissés	?
A 20	Lentille	Non labour	Maïs	-	-	-	-	Non labour	2,9	Faible	oui	7.5T	Très élevé		Laissés	Enfouis
A 21	Lentille	Non labour	Pois	Légumineuse + autres	Pâturage	Biomasse élevée	-	Non labour	5,18	Elevé	oui		Très faible		Laissés	?
A1	Quinoa	Labour	Blé	-	-	-	-	Labour	1,8	Faible	oui	70 qtx	Moyen à élevé		Exportés	-
A 22	Quinoa	Labour	Blé	-	-	-	Fientes	Labour	0	Nul	oui	73 qtx	Moyen à élevé	Bonne qualité	Laissés	Enfouis

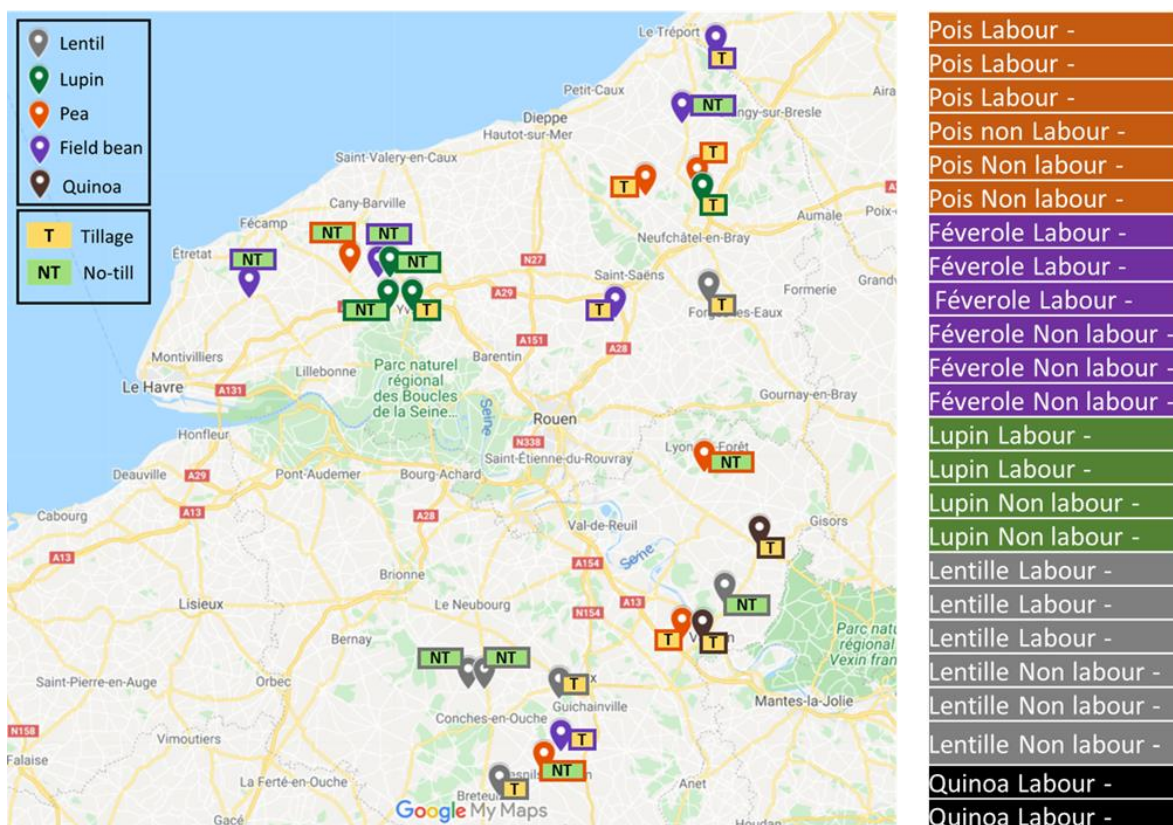


Figure 4 : Représentation cartographique de la répartition des cultures dans les parcelles des 21 agriculteurs Normands

Le suivi des cultures a consisté dans la réalisation de 3 campagnes d'échantillonnage afin de pouvoir évaluer l'état du sol avant implantation des cultures, pendant leur cycle de développement et après récolte. Ainsi, 24 échantillons ont été prélevés à chaque campagne d'échantillonnage, cela correspond à 72 échantillons au total sur les 3 dates (mars 2021, juillet 2021, octobre /novembre 2021).

Concernant la stratégie d'échantillonnage (**Figure 5**), pour chaque culture et dans chaque parcelle agriculteur (exploitation), une zone représentative de la parcelle a été choisie, un point est géolocalisé. L'échantillon de sol composite prélevé correspond au mélange de 10 prélèvements réalisés à la périphérie d'un cercle de 20 mètres de rayon, pour constituer un échantillon moyen de la parcelle. Le sol a été prélevé sur une profondeur de 0-20 cm à l'aide d'une tarière. 24 échantillons par date de prélèvement ont été analysés, 72 échantillons au total sur les 3 dates (mai 2021, juillet 2021, octobre 2021).

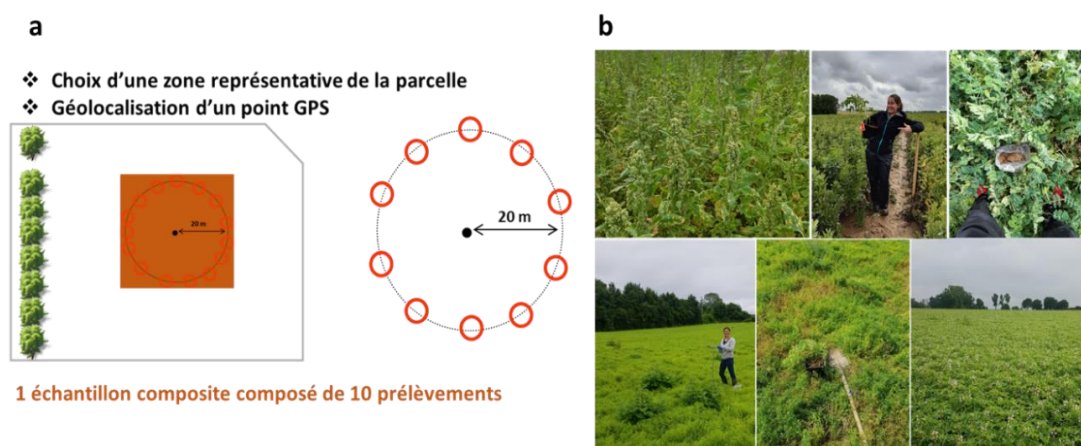


Figure 5 : Illustration des campagnes d'échantillonnage réalisées chez les agriculteurs identifiés par Cerfrance dans le cadre du projet PROVEG. a) Stratégie d'échantillonnage, b) photos de quelques parcelles agricoles

4.1.1.3. Paramètres physicochimiques et biologiques mesurés sur les échantillons de sols

Les échantillons de sols issus des sites expérimentaux mis en place par Natup et des parcelles des agriculteurs identifiés par Cerfrance, ont fait l'objet d'un suivi qui s'est focalisé sur l'acquisition de variables descriptives des paramètres physicochimiques des sols tels que texture, pH, P Olsen, teneur C total, C organique, C labile, N total et N minéral. Les références des protocoles de mesure sont présentées dans le **Tableau 4**.

Tableau 4 : Paramètres physicochimiques mesurés dans les échantillons de sols dans le cadre du projet PROVEG

Information	Indicateur mesuré	Protocole (Norme / références bibliographiques)
Statut physique du sol	Texture	NFX31-107
	Humidité	NF ISO 11465
Statut chimique du sol	pH eau, pH KCl	NF ISO 10390
Statut organique & minéral du sol	Carbone total	NF ISO 10694
	Carbone organique	NF ISO 10694
	Matière organique, C/N	Carbone organique X 1.72
	Carbone labile	D'après Weil et al (2003) et Culman et al (2012)
	Azote total	ISO 13878
	Azote minéral	XPU 44 163
	Phosphore Olsen	NF ISO 11263
	Calcium	NF X 31-108

Concernant les paramètres biologiques, le suivi de l'abondance des communautés microbiennes a été réalisé. L'extraction d'ADN du sol et sa quantification ont permis une estimation de la biomasse moléculaire totale, les biomasses bactérienne et fongique. Cette analyse de l'abondance a été complétée par le suivi de la glomaline, une glycoprotéine produite par les champignons mycorhiziens à arbuscules ainsi que du taux de mycorhization sur les racines des plantes. Aussi la détermination du potentiel infectieux d'*A. euteiches*, par outil moléculaire a été réalisée dans les échantillons de sol sous cultures de pois et de lentille. En parallèle de la caractérisation des communautés microbiennes, un suivi des activités enzymatiques résultantes a été effectué par le dosage d'activités enzymatiques liées

aux cycles du carbone (β -glucosidase) de l'azote (arylamidase) du soufre (arylsulfatase) et du phosphore (phosphatase acide). Les références des protocoles utilisés sont répertoriées dans le **Tableau 5**.

Il est à noter que pour des raisons logistiques et techniques, l'évaluation des communautés microbiennes par l'analyse de la diversité fonctionnelle potentielle par le système Biolog, a pu être déployée uniquement pour les dispositifs en sites expérimentaux en microparcelles.

L'ensemble des prélèvements et analyses a été réalisé par les membres du laboratoire AGHYLE (UniLaSalle).

Tableau 5 : Paramètres biologiques mesurés sur les échantillons de sols dans le cadre du projet PROVEG

Information		Indicateur biologique mesuré	Protocole (Norme / références bibliographiques)
Abondance microbienne	Microorganismes totaux	Quantification de l'ADN total	(Gangneux et al., 2011)
	Bactéries totales	Quantification de l'ADNr 16S par PCR en temps réel	(Gangneux et al., 2011)
	Champignons totaux	Quantification de l'ADNr 18S par PCR en temps réel	(Gangneux et al., 2011)
	Champignons mycorhiziens	Evaluation du taux de mycorhization des racines	(Thioye et al., 2021)
	Glomaline	Dosage de protéines dans le sol	(Wright and Upadhyaya, 1998)
Structure des communautés microbiennes	Profil de diversité fonctionnelle potentielle des bactéries cultivables	Système Biolog	(Calbrix et al., 2005)
Activités enzymatiques	Cycle du C	β -glucosidase	ISO 20130:2018; (Cheviron et al., 2022)
	cycle du N	Arylamidase	ISO 20130:2018; (Cheviron et al., 2022)
	cycle du P	Phosphatase acide	ISO 20130:2018; (Cheviron et al., 2022)
	cycle du S	Arylsulfatase	ISO 20130:2018; (Cheviron et al., 2022)

4.1.1.4. Construction des bases de données

Deux bases de données (BDD) ont été construites : une première BDD à partir des données issues des microparcelles et une seconde avec les données des parcelles agriculteurs. Chacune de ces BDD est structurée en deux parties : une partie concernant les données liées aux pratiques culturales et aux informations générales des parcelles et une seconde partie regroupant les différentes variables analytiques mesurées.

4.1.1.4.1. Base de données - Microparcelles

La base de données microparcelles regroupe les données issues des microparcelles de l'Eure et de la Seine-Maritime. Pour chacune des 3 campagnes de prélèvement, 12 échantillons de sol (3 par culture) ont été analysés dans chaque département, correspondant à 24 observations au total par campagne. Pour l'ensemble des campagnes de prélèvement, la BDD est constituée de 72 observations.

Les données liées aux pratiques culturales de la BDD concernent les années n (année du prélèvement) et n-1 (année précédente). Ces données ont été renseignées par Natup. Une synthèse des données d'itinéraires techniques (ITK) est présentée dans le Tableau 2.

La partie de la BDD constituée des données analytiques comprend 42 colonnes (indicateurs physico-chimiques et microbiologiques mesurés) pour 72 lignes.

4.1.1.4.2. Base de données - Parcelles agriculteurs

La base de données des parcelles agriculteurs regroupe les données des 24 parcelles agricoles étudiées. Ainsi pour chacune des 3 campagnes de prélèvement, 24 échantillons de sol ont été analysés, correspondant à 72 observations au total sur les 3 campagnes.

Les données liées aux pratiques culturales de la BDD concernent les 5 années (de l'année n du prélèvement jusqu'à l'année n-4). Ces données ont été collectées auprès des 21 agriculteurs par Cerfrance. Une synthèse des données d'itinéraires techniques (ITK) pour l'année n est présentée dans le **tableau 6**. Les données en vert correspondent aux informations communiquées par les agriculteurs et les données en orange correspondent aux informations manquantes dans la BDD. Ici, seul l'exemple de l'année d'implantation des légumineuses (année n du prélèvement) est représenté.

La partie de la BDD constituée des données analytiques comprend 38 colonnes (indicateurs physico-chimiques et microbiologiques mesurés) pour 72 lignes.

Tableau 6 : Synthèse des données d'ITK renseignées par les agriculteurs

Description échantillon	Référence échantillon laboratoire	Année n du prélèvement										
		Culture en place	Semis couvert : type, date, matériel utilisé	Destruction couvert (date, matériel utilisé)	Biomasse couvert (faible, moyen, fort)	Apport d'effluents organiques : date, type, dose, matériel utilisé	Travail du sol : type, profondeur, outil	Semis : date, variété, densité, matériel utilisé	Fertilisation minérale : date apport, type, dose, matériel utilisé	Protection des cultures : récupérer registre phyto, matériel utilisé	Récolte : date, rendement, qualité	Résidus : rdt, exporté ou non
Pois Labour	A1											
Pois Labour	A2											
Pois Labour	A3											
Pois non Labour	A4											
Pois Non labour	A5											
Pois Non labour	A6											
Féverole Labour	A7											
Féverole Labour	A8											
Féverole Labour	A9											
Féverole Non labour	A10											
Féverole Non labour	A11											
Féverole Non labour	A12											
Lupin Labour	A13											
Lupin Labour	A14											
Lupin Non labour	A15											
Lupin Non labour	A16											
Lentille Labour	A17											
Lentille Labour	A18											
Lentille Labour	A19											
Lentille Non labour	A20											
Lentille Non labour	A21											
Lentille Non labour	A22											
Quinoa Labour	A23											
Quinoa Labour	A24											

	Données renseignées
	Données non renseignées

4.1.1.5. Analyses statistiques des données

L'analyse des données a été réalisée avec le logiciel de traitement de données et d'analyse statistique RStudio (Version 1.3.1093).

4.1.1.5.1. Analyses multivariées

Des analyses multivariées ont été réalisées sur les données issues des microparcelles et parcelles agriculteurs respectivement. Des Analyses en Composantes Principales (ACP) prenant en compte l'ensemble des données (n=72) ont permis d'étudier l'importance de plusieurs facteurs (facteurs en lien avec l'ITK et le pédoclimat) dans l'explication de la variabilité globale des observations. Les indicateurs physico-chimiques et microbiologiques sont pris en compte dans ces ACP. De plus, des ACP uniquement sur les données au cours de la culture ont permis d'étudier l'effet type de légumineuses en place sur les indicateurs analysés.

Afin d'évaluer si le type de culture étudié avait un effet sur la variabilité des indicateurs mesurés, une classification ascendante hiérarchique a été réalisée.

En parcelles agricoles, une Analyse des Correspondances Multiples (ACM) a également été réalisée afin de déterminer des typologies de systèmes de culture. Cette analyse pourrait permettre de mettre en évidence des relations entre les types de systèmes de culture et le rendement des cultures.

4.1.1.5.2. Analyses des corrélations 2 à 2

Des matrices de corrélation de Spearman ont été réalisées afin d'étudier les corrélations entre les indicateurs deux à deux (indicateurs physico-chimiques, microbiologiques et agronomiques). Ces matrices ont pris en compte les données des microparcelles et parcelles agriculteurs respectivement. Une analyse globale (microparcelles et parcelles agriculteurs) a également été réalisée afin de déterminer les relations entre l'état biophysico-chimique du sol et le rendement obtenu.

4.1.1.5.3. Analyses univariées

Des tests de comparaisons ont été effectués via le test non paramétrique de Kruskal-Wallis suivi d'une comparaison post hoc des moyennes réalisées via le package « nparcomp » de R. Ces comparaisons ont été étudiées par pédoclimat (Eure et Seine-Maritime) en microparcelles et par type de travail du sol (labour et non labour) en parcelles agriculteurs. Elles ont permis d'étudier l'effet date de prélèvement (pour une culture donnée) et l'effet culture (pour une date de prélèvement donné).

4.1.2. Evaluation multicritère des systèmes de culture

Une évaluation des trois composantes de la durabilité (composante économique, environnementale et sociale) à l'échelle des systèmes de culture mis en œuvre par les agriculteurs sur les parcelles suivies a également été réalisée. L'outil choisi est l'outil Masc 2.0. Cet outil a été développé par quatre unités impliquant l'INRAe (unités Agronomie et Eco-Innov de Grignon, AGIR de Toulouse, LAE de Nancy-Colmar) et des établissements d'enseignement supérieur (AgroParisTech, INPL, INPT). Son livrable est un arbre d'évaluation qualitative (**arbre complet en annexe 1**) comprenant 3 sous arbres eux-mêmes composés d'arbres dits satellites. Les 3 sous arbres sont :

(1) contribution à la dimension économique : ce critère prend en compte les préoccupations et exigences de l'agriculteur, de la société et de la filière. La contribution au développement économique des systèmes de culture est évaluée en considérant simultanément trois aspects : les résultats économiques du système, l'évolution de la capacité productive à long terme des parcelles exploitées et la contribution au développement économique des filières et du territoire dans lequel le système de culture est intégré.

(2) contribution à la dimension sociale : ce critère donne une appréciation qualitative sur la compatibilité du système de culture avec les attentes « sociales » de l'agriculteur et celles de la société

(3) contribution à la dimension environnementale : ce critère caractérise la contribution des systèmes de culture à la dimension environnementale en considérant leurs impacts potentiels sur la qualité du milieu, sur les ressources abiotiques et sur la biodiversité.

Pour réaliser ces évaluations, des entretiens auprès des agriculteurs ont été réalisés afin de collecter l'ensemble des données d'entrée. Ces données ont été saisies dans Excel puis intégrées dans le logiciel Dexi pour implémentation dans Masc. Pour certains indicateurs, il a fallu passer par un calcul intermédiaire grâce à la méthode INDIGO. Les pondérations utilisées pour l'agrégation au fur et à mesure des critères sont celles livrées par défaut dans Masc 2.0 et présentées dans le schéma ci-dessous (**Figure 6**). En cas de données d'entrée manquantes, le critère correspondant a été neutralisé dans l'arbre. Ainsi, pour la composante dimension économique, l'intégralité des critères a été calculé pour les agriculteurs clients Cerfrance. Pour les agriculteurs non-clients, toutes les données n'étant pas accessibles, une évaluation partielle de cette dimension a été réalisée.

Pour chaque système de culture étudié, l'arbre de durabilité a été construit puis une analyse Forces/Faiblesses pour les trois dimensions a été réalisée.

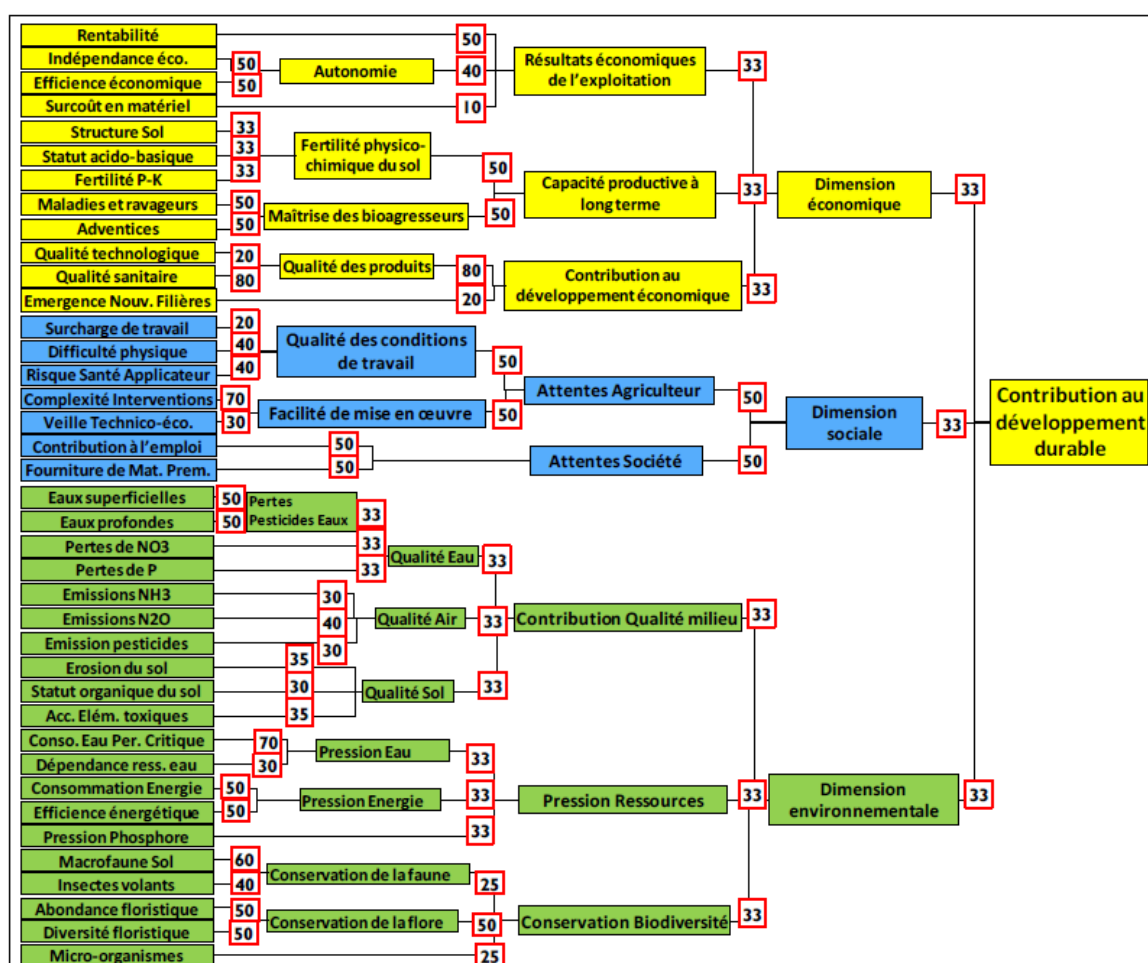


Figure 6 : Présentation des pondérations utilisées pour l'agrégation au fur et à mesure des critères de chacune des composantes tels que paramétrés dans Masc 2.0

4.2. Action 2 : Potentiel de développement des cultures de légumineuses en région Normandie

4.2.1. Modélisation de la performance des cultures

Afin d'évaluer le potentiel de développement des cultures de pois et de fève, des simulations du rendement de ces cultures ont été réalisées, selon la démarche détaillée dans la **Figure 7**, avec le modèle STICS dans 5 types de sols : limon de vallon, limon battant, limon à silex, limon sableux et limon argileux à silex, avec les données météorologiques de 9 stations météo sur 11 années (données de 2010 à 2020) pour évaluer le risque de chaque culture. Seulement le pois et la fève ont pu être simulés (Falconnier et al., 2019), les autres cultures (quinoa, lupin et lentille) ne sont pas encore paramétrées sur STICS. Les itinéraires techniques des agriculteurs pour ces cultures ont été utilisés pour les simulations.

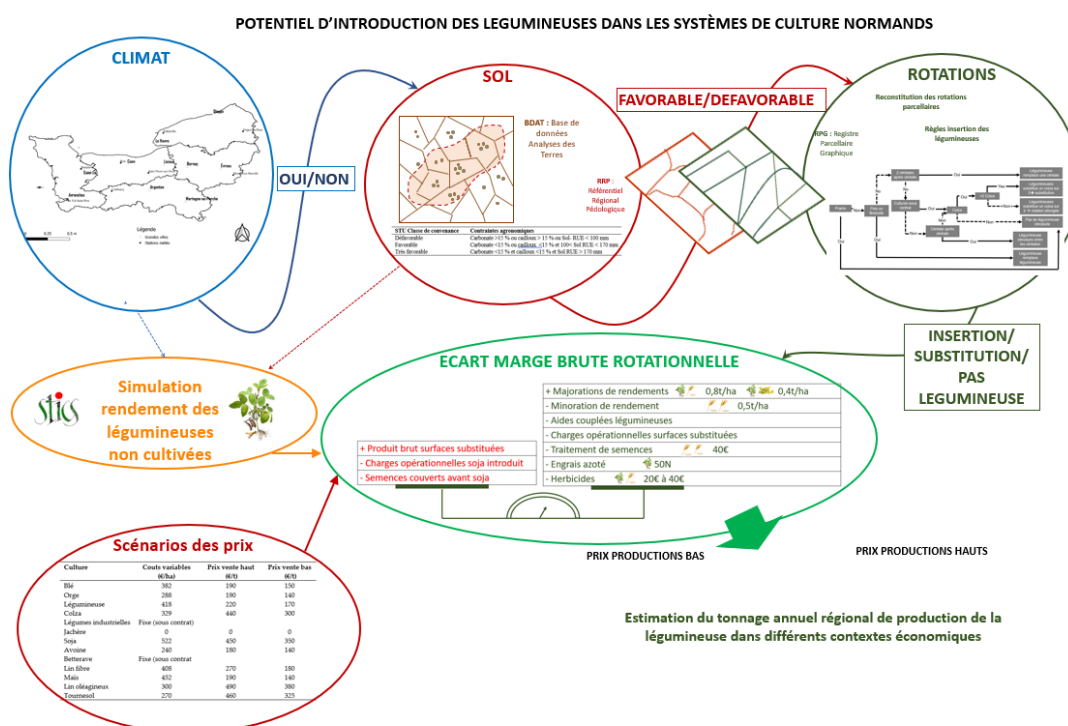


Figure 7 : Schéma général de la méthodologie suivie pour estimer le potentiel de production territoriale de légumineuses en région Normandie

En parallèle les rotations de toutes les parcelles de Normandie ont été collectées grâce à l'outil RPGexplorer (Levavasseur et al., 2016) et aux règles d'insertion des légumineuses (**Figure 8**, adaptée de (Marraccini et al., 2020) qui ont permis d'identifier de nouvelles rotations. La marge brute rotationnelle a été calculée avant et après l'insertion des légumineuses pour évaluer le potentiel agronomique et économique sur l'ensemble du territoire, pour ainsi pouvoir évaluer le potentiel maximum de production à l'échelle régionale.

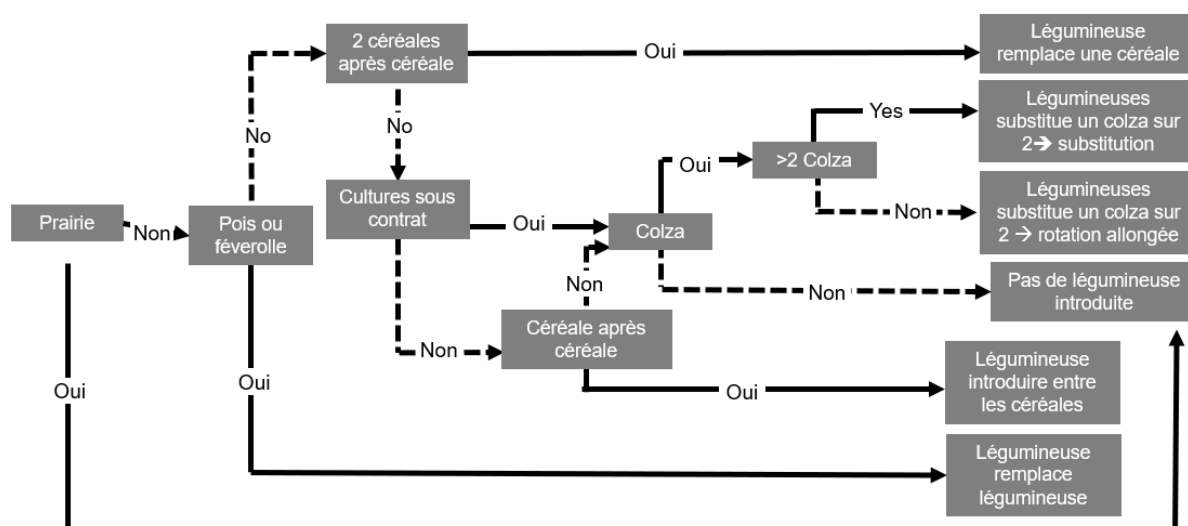


Figure 8 : Règles d'insertion des légumineuses dans les rotations normandes

4.2.2. Qualité sanitaire des cultures

4.2.2.1. Détermination du potentiel infectieux d'*Aphanomyces euteiches* dans les sols

Aphanomyces euteiches est un oomycète qui provoque la pourriture racinaire du pois, maladie qui occasionne des dégâts très importants sur les cultures, conduisant à de fortes pertes en rendement. Toutefois, si certains fongicides ont pu démontrer une certaine efficacité à limiter le développement de la maladie, leur effets restent très variables en plein champ (Oyarzun et al., 1990; Wu et al., 2019). Dans un contexte plus durable de l'agriculture, le recours au diagnostic préventif et prédictif de la maladie reste une piste intéressante. En effet, il s'agit ici de baser la stratégie de lutte sur l'évitement de la maladie plutôt que son éradication par l'évaluation de la quantité d'*A. euteiches* présente et la détermination d'un risque de développement de la maladie avant semis d'une culture sensible. Plusieurs méthodes existent. Celle utilisée dans le cadre du projet PROVEG consiste à détecter et quantifier le pathogène directement dans les sols, sans nécessité de cultiver des plantes, selon une approche moléculaire de PCR en temps réel (Sauvage et al., 2007; Gangneux et al., 2014). Gangneux et al., (2014) ont ainsi pu montrer l'existence d'une relation linéaire positive entre la quantité d'ADN d'*A. euteiches* retrouvée dans le sol et le potentiel infectieux, réalisé en parallèle par un test biologique (**Figure 9**). Dans le cadre du projet PROVEG, la quantification du potentiel infectieux d'*Aphanomyces euteiches* a été réalisée selon la méthode de Gangneux et al., (2014). En effet, après extraction de l'ADN du sol de cultures de pois et lentille et la quantification et du nombre de copie de gène d'*Aphanomyces euteiches*, le potentiel infectieux (PI) a été déterminé.

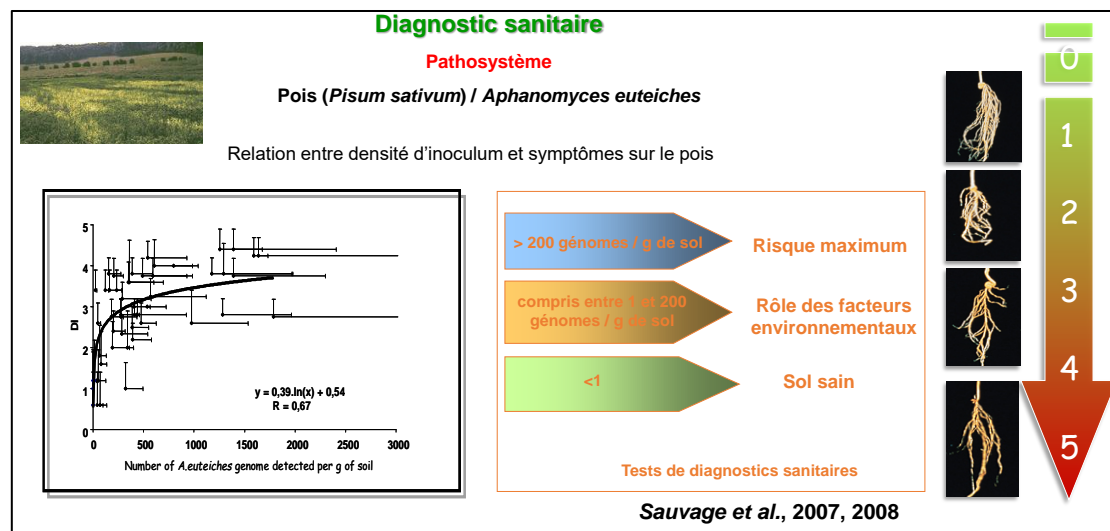


Figure 9 : Détermination du potentiel infectieux d'*Aphanomyces euteiches* dans les sols

4.2.2.2. Intérêt des cultures de légumineuses en association

Les légumineuses, comme la féverole, sont déjà utilisées comme intercultures dans les systèmes de rotations de culture pratiquées actuellement en Normandie (Lepse et al., 2017). Par ailleurs, des essais en laboratoire ont montré un effet protecteur de la féverole sur une autre légumineuse cultivée en Normandie, le pois. En effet, des travaux de recherche réalisés en conditions hydroponiques de laboratoire (Laloum, 2017; Laloum et al., 2021) ont montré que les exsudats racinaires de féverole exercent un effet répulsif sur les zoospores de l'oomycète *Aphanomyces euteiches*. *A. euteiches* est l'agent pathogène tellurique responsable de la pourriture racinaire chez les légumineuses hautement sensibles : le pois et la lentille. Ces travaux ont également révélé que la colonisation des racines de pois par les zoospores est significativement réduite lors de l'application d'exsudats racinaires de féverole ou lors de la co-culture pois-féverole. Ces données de laboratoire suggèrent un éventuel rôle protecteur des sécrétions racinaires de la féverole sur le pois vis à vis de l'oomycète pathogène. Toutefois, la nature des molécules impliquées dans ces mécanismes reste encore inconnue.

La défense racinaire reste, à l'heure actuelle, moins bien documentée que la défense au niveau des parties aériennes de la plante. La coiffe racinaire est programmée pour libérer dans le sol des cellules frontières (ou AC-DCs pour root Associated Cap-Derivated Cells). Ces cellules lorsqu'elles se détachent de façon isolée dans la rhizosphère sont appelées cellules bordantes (BCs). Ces cellules sont enrobées dans un épais mucilage les maintenant à proximité de la coiffe racinaire. L'ensemble de cette structure, mucilage et cellules frontières, se nomme le Root Extracellular Trap (RET) ou piège extracellulaire de racine qui est impliquée dans la défense racinaire (Driouich et al., 2013). De nombreuses glycomolécules pariétales sont associés aux cellules bordantes, et peuvent jouer un rôle très important dans la défense racinaire, on peut citer les hémicelluloses, les pectines, les extensines ou bien les arabinogalactane protéines (AGPs) (Figure 10) ; (Cannesan et al., 2012). Les cellules bordantes sont aussi spécialisées dans la production de molécules antimicrobiennes comme de l'ADN extracellulaire ou des phytoalexines (Plancot et al., 2013). Une meilleure connaissance des molécules constituant le RET et les exsudats racinaires sont nécessaires pour une compréhension des mécanismes de défense au niveau racinaire. Ces cultures expérimentales associeront les plantes sensibles à *A. euteiches* (lentille ou pois) à la féverole.

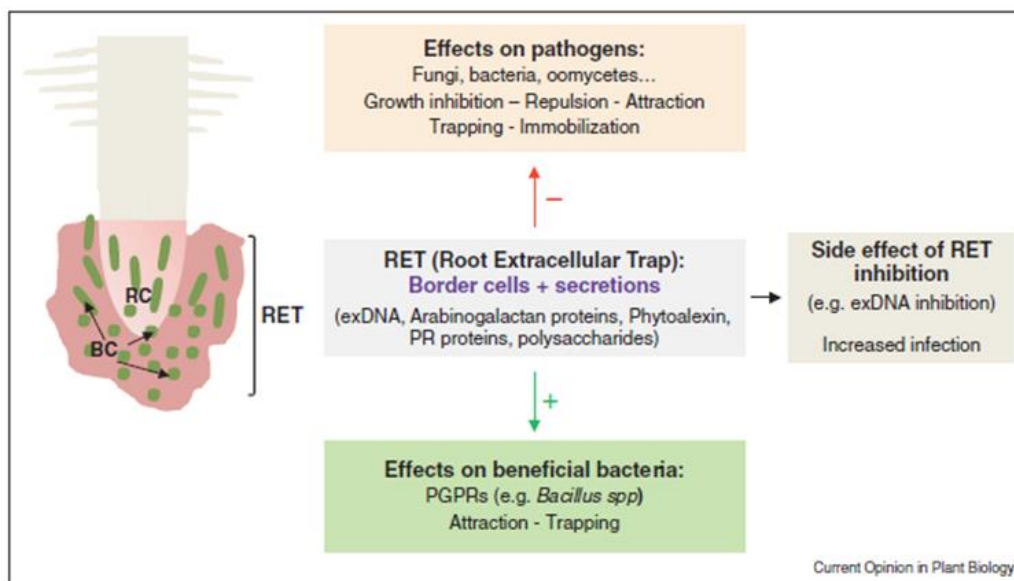


Figure 10 : Composition du RET et effets sur les micro-organismes de la rhizosphère (Driouich et al., 2013). RC : Root Cap ; BC : Border cells. Le RET permet d'inhiber (-) les effets des différents pathogènes tout en favorisant (+) une interaction avec les bactéries bénéfiques du sol.

5. Résultats

5.1. Action 1 : Etat initial des sols étudiés & performance des cultures

5.1.1. Etat initial des sols étudiés

5.1.1.1. Texture, teneur en calcaire et qualité structurale des sols étudiés

Microparcelles

Les textures des sols des microparcelles et des parcelles agriculteurs ont été caractérisées par la détermination des teneurs en argile, limon et sable dans les échantillons de sols. En amont de ces mesures, les sols ont été décarbonatés et la matière organique détruite. Ainsi, la somme des teneurs en argile, limon et sable est égale à 100%. Les classes de texture ont ensuite été déterminées en plaçant chaque parcelle sur le triangle des textures GEPPA. Les résultats montrent que parmi les 24 microparcelles, 3 sont classées en limon (L) (1 dans l'Eure et 2 en Seine-Maritime). Ces sols correspondent aux parcelles cultivées en lentille. Les 21 autres microparcelles étudiées sont classées en limon pur (LL) (**Figure 11 A**). Les teneurs en argile, limon et sable ont été comparées entre les différentes cultures pour chaque pédoclimat (**Annexe 2**). La **Figure 11 B** présente les résultats obtenus pour les comparaisons du taux d'argile entre les différentes cultures déployées en microparcelles et montre que dans l'Eure, la teneur en argile des sols est significativement supérieure pour les microparcelles sous lentille comparativement aux sols des 3 autres cultures. En Seine-Maritime, les microparcelles sous lentille ont présenté des teneurs en argile supérieures et significativement différentes des microparcelles sous lupin qui ont présenté des teneurs plus faibles.

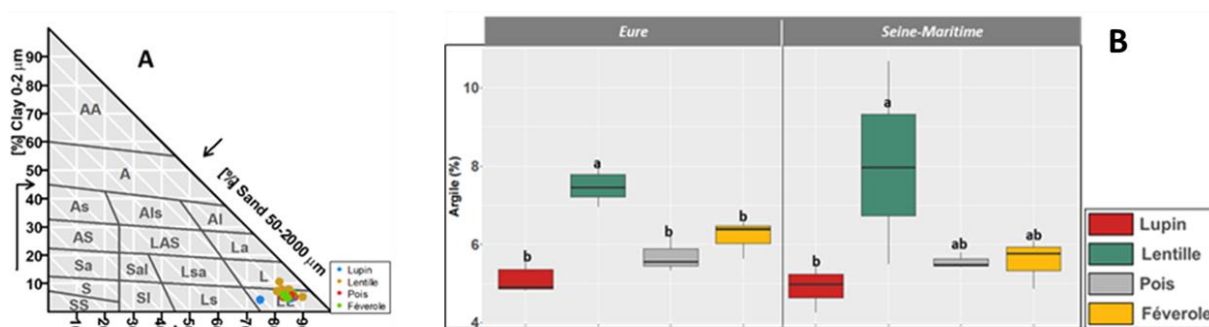


Figure 11 : Détermination des classes de textures et du taux d'argile des sols des microparcelles. (A) représentation des sols pour chaque cultures sur le triangle des textures GEPPA. (B) Boxplots de la teneur en argile (%) des sols pour chaque culture dans l'Eure et la Seine Maritime. Les tests statistiques ont été réalisés avec le package « nparcomp » de RStudio

La teneur en calcaire des échantillons de sols a aussi été mesurée. Cette analyse permet de déterminer si le sol d'une parcelle peut être considéré ou non comme calcaire. En effet, un sol peut être considéré comme calcaire à partir d'une teneur en CaCO_3 de 5% (Félix-Faure et al., 2013). Sur les 24 microparcelles, seulement 3 microparcelles ont présenté des sols calcaires. Ces microparcelles sont localisées en Seine-Maritime et correspondent aux parcelles cultivées en lentille. Une parcelle parmi les 3 désignées comme calcaires est classée en limon pur (LL) (Figure 12 A). Ces microparcelles de lentille ont présenté un taux de calcaire élevé comparativement aux autres microparcelles en Seine Maritime et dans l'Eure (Figure 12 B).

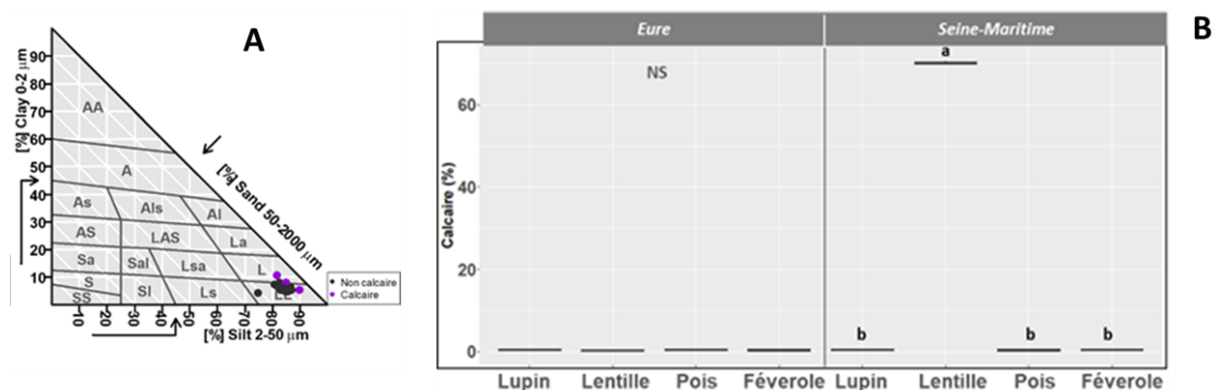


Figure 12 : Représentation des sols calcaires par texture et détermination du taux de calcaire des sols des microparcelles. (A) représentation des sols calcaires pour chaque culture sur le triangle des textures GEPPA. (B) Boxplots de la teneur en calcaire (%) des sols pour chaque culture dans l'Eure et la Seine Maritime. Les tests statistiques ont été réalisés avec le package « nparcomp » de RStudio

La qualité structurale des sols a été estimée selon la méthode de Johannes et al. (2017) par le calcul du rapport **teneur en MO (%) / teneur en argile (%)** (Johannes et al., 2017). En effet, si ce ratio a une valeur supérieure à 17%, la qualité structurale du sol est jugée satisfaisante. Les sols des microparcelles, ont présenté en moyenne un rapport MO / Argile de 19% dans l'Eure et de 33% dans la Seine-Maritime (Figure 13). Dans l'Eure, pour 5 microparcelles sur 12 (2 en lentille, 2 en féverole et 1 en lupin) ce rapport est inférieur au seuil considéré. En Seine-Maritime, le rapport MO / argile de toutes les microparcelles est supérieur au seuil de 17%. Ces résultats montrent que la qualité structurale des sols avant implantation des légumineuses est correcte en Seine-Maritime. Cette qualité structurale est moins satisfaisante dans l'Eure pour certaines parcelles.

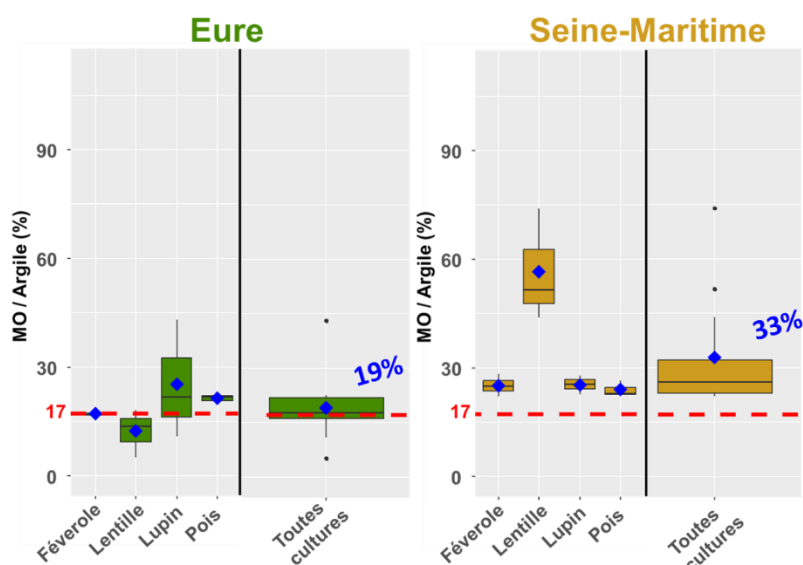


Figure 13 : Qualité structurale des sols des microparcelles dans l'Eure et la seine Maritime. Boxplots représentant la variation du ratio MO / Argile (%). Les tests statistiques ont été réalisés avec le package « nparcomp » de RStudio

Les microparcelles cultivées en lentille dans chaque pédoclimat ne sont pas localisées sur le même périmètre que les 3 autres cultures. Les sols sous lentille sont plus argileux (dans les deux pédoclimats) et plus calcaires (Seine-Maritime uniquement). Ces différences dans les caractéristiques physico-chimiques peuvent impacter l'état biologique des sols.

Parcelles agriculteurs

Pour les parcelles agriculteurs, parmi les 24 parcelles, 17 sont classées en limon pur (LL), 4 en limon (L), 2 en limon sableux (Ls) et une en limon sablo-argileux (Lsa) (**Figure 14 A**). Concernant la teneur en CaCO_3 des sols, 2 parcelles sont calcaires. Ces deux parcelles sont classées en limon pur et étaient cultivées en pois l'année des prélèvements (**Figure 14 B**).

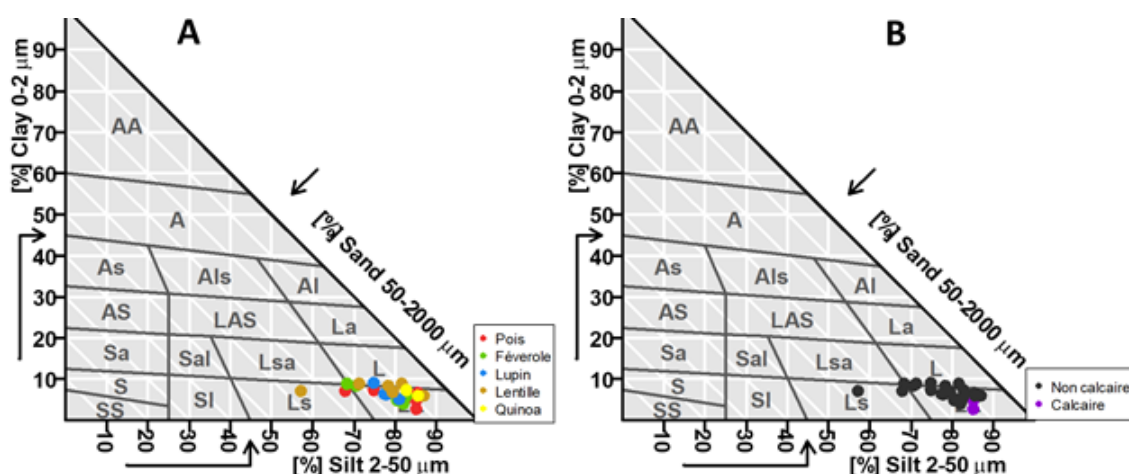


Figure 14 : Représentation des sols des parcelles agriculteurs en labours et en non-labour. (A) représentation des sols pour chaque cultures sur le triangle des textures GEPPA. (B) représentation des sols calcaires pour chaque cultures sur le triangle des textures GEPPA.

Pour les parcelles agriculteurs, le rapport MO / Argile permettant d'estimer l'état structural du sol était en moyenne de 34% dans les parcelles en labour, une seule parcelle sur les 13 a présenté un seuil

inférieur au seuil acceptable (parcelle en quinoa) (**Figure 15**). Le rapport MO / Argile était de 33% en moyenne dans les parcelles en non-labour correspondant à une qualité structurale satisfaisante.

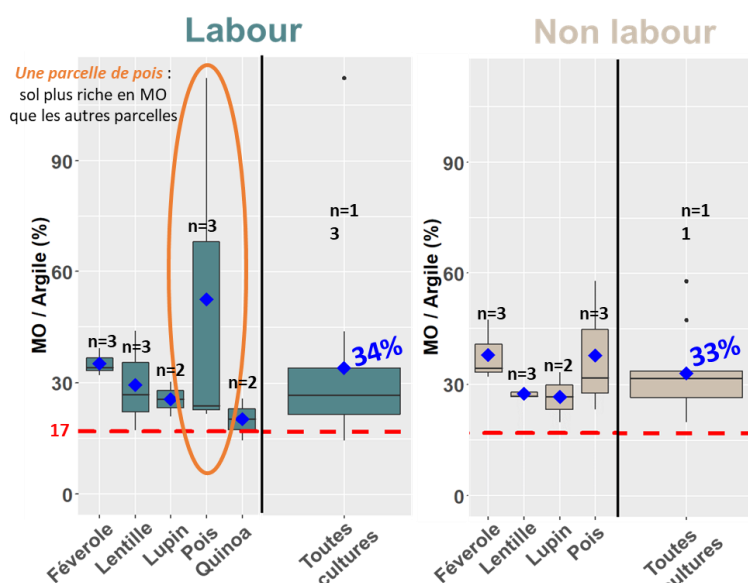


Figure 15 : Qualité structurale des sols des microparcelles dans l'Eure et la Seine Maritime. Boxplots représentant la variation du ratio MO / Argile (%). Les tests statistiques ont été réalisés avec le package « nparcomp » de RStudio

5.1.1.2. Représentativité des indicateurs mesurés dans le référentiel de sols de grande culture au niveau national

Un référentiel est une gamme de variation de valeurs pour chaque indicateur mesuré. Le référentiel utilisé ici est un référentiel national. Il s'agit de valeurs d'indicateurs mesurés sur des sols issus de différentes situations agronomiques réparties sur l'ensemble du territoire français. Ce référentiel permet d'évaluer le niveau de chaque indicateur, classé de très faibles à très élevés.

L'analyse de la représentativité des valeurs des indicateurs mesurées sur les sols des microparcelles (**Tableau 7 A**) et des parcelles agriculteurs (**Tableau 7 B**) a été étudiée en replaçant la valeur de chaque indicateur dans ce référentiel national de sol de grande culture. Globalement, les valeurs des indicateurs physico-chimiques mesurées en microparcelles et en parcelles agriculteurs sont plutôt faibles à moyennes (hormis la teneur en P Olsen qui semble élevée). Les indicateurs microbiologiques liés à l'abondance des bactéries et champignons (ADNr 16S et ADNr 18S) sont plutôt faibles ; ceux renseignant sur l'abondance des microorganismes totaux (ADN total) et les activités enzymatiques des cycles C, N, S et P sont globalement élevés. Ce premier niveau d'analyse met en exergue, des niveaux d'abondance et d'activités microbiennes plutôt correctes, voir élevées (dans certains cas) dans des sols normands pourtant peu riches en matières organique dans l'ensemble.

Tableau 7 : Positionnement dans un référentiel national de la valeur de chaque indicateur mesuré en microparcelles.

Microparcelles

A		Indicateur	Unité	Référentiel national AGHYLE								
				Nombre d'observations	Minimum	Maximum	Nombre d'observations en microparcelles (n=72, 3 campagnes)					Hors du référentiel
							Très faibles	Faibles	Moyennes	Elevées	Très élevées	
Indicateurs physico-chimiques	C total	%	364	0,6	11,0	27	15	18	0	7	5	
	C organique	%	798	0,6	5,5	30	11	18	0	9	4	
	C oxydable	mg/kg	383	390,2	1655,0	48	1	3	3	0	17	
	N total	%	772	0,0	0,3	55	1	7	5	1	3	
	N minéral	mg/kg	206	0,6	91,4	33	19	16	0	0	4	
	P Olsen	mg/kg	281	0,0	504,0	0	0	3	69	0	0	
Indicateurs microbiologiques	ADN total	µg/g	1010	1,5	31,3	1	6	28	26	10	1	
	ADNr 18S	copies/g	504	1,8E+05	4,3E+10	41	3	4	24	0	0	
	Glomalline	mg/g	83	0	13,6	0	2	17	14	16	23	
	ADNr 16S	copies/g	539	3,9E+04	5,4E+10	35	13	0	1	20	3	
	β-glucosidase	nmol PNP/min/g	1018	0,0	68,5	0	9	20	33	10	0	
	Arylamidase	nmol β-NAPH/min/g	975	0,1	16,7	0	9	1	12	45	5	
	Arylsulfatase	nmol PNG/min/g	56	0,7	7,8	0	0	62	1	3	6	
	Phosphatase acide	nmol PNP/min/g	292	0,0	85,9	0	0	0	43	29	0	

Parcelles agriculteurs

B		Indicateur	Unité	Référentiel national AGHYLE								
				Nombre d'observations	Minimum	Maximum	Nombre d'observations en parcelles agriculteurs (n=72, 3 campagnes)					Hors du référentiel
							Très faibles	Faibles	Moyennes	Elevées	Très élevées	
Indicateurs physico-chimiques	C total	%	364	0,6	11,0	11	15	11	23	11	1	
	C organique	%	798	0,6	5,5	14	13	10	19	15	1	
	C oxydable	mg/kg	383	390,2	1655,0	35	8	8	6	6	9	
	N total	%	772	0,0	0,3	35	6	8	6	13	4	
	N minéral	mg/kg	206	0,6	91,4	29	26	13	3	0	1	
	P Olsen	mg/kg	281	0,0	504,0	0	1	3	66	1	1	
Indicateurs microbiologiques	ADN total	µg/g	1010	1,5	31,3	2	6	7	32	23	2	
	ADNr 18S	copies/g	504	1,8E+05	4,3E+10	30	13	26	2	0	1	
	Glomalline	mg/g	83	0	13,6	17	5	12	13	2	23	
	ADNr 16S	copies/g	539	3,9E+04	5,4E+10	37	28	6	0	0	1	
	β-glucosidase	nmol PNP/min/g	1018	0,0	68,5	0	2	9	14	45	2	
	Arylamidase	nmol β-NAPH/min/g	975	0,1	16,7	0	0	0	4	47	21	
	Arylsulfatase	nmol PNG/min/g	56	0,7	7,8	0	0	27	9	0	36	
	Phosphatase acide	nmol PNP/min/g	292	0,0	85,9	0	0	0	13	28	31	



Le référentiel est basé sur des données acquises pour différents projets par l'unité de recherche AGHYLE d'UniLaSalle. Pour chacune des 72 observations (pour les 3 campagnes de prélèvement), le niveau de l'indicateur a été défini (très faible, faible, moyen, élevé, très élevé).

5.1.1.3. Etude de la variabilité spatiale des indicateurs bio-physicochimiques mesurés

La variabilité spatiale a été étudiée (**Figure 16**) afin de pouvoir estimer la précision de chaque variable mesurée. En effet, dans les mêmes conditions agropédoclimatiques et pour la même date de prélèvement, cette précision correspond à la variabilité des mesures entre répétitions spatiales. La précision de la variable est considérée d'autant plus élevée que la variabilité spatiale inter-répétitions est faible. La variabilité spatiale est étudiée en calculant le coefficient de variation (CV en %). Des seuils de CV « acceptables » ont été définis notamment par Bouthier et al., 2015. Ils sont de 15% pour les variables physico-chimiques et de 25% pour les variables microbiologiques.

Pour les microparcelles, une valeur de CV a été calculée en considérant comme répétitions spatiales les 3 microparcelles (bandes) de la même culture, dans le même pédoclimat et à la même date de

prélèvement. Ainsi au total, 24 valeurs de CV renseignant sur la variabilité inter-bandes ont été déterminées par variable mesurée.

Pour les parcelles agriculteurs, une valeur de CV a été calculée en considérant comme répétitions spatiales les parcelles agriculteurs avec la même culture et le même mode de travail du sol. Ainsi au total, 27 valeurs de CV renseignant sur la variabilité inter-parcelles ont été déterminées par variable mesurée.

Concernant les variables physico-chimiques (**Figure 16 A**), sur les parcelles agriculteurs, les valeurs médianes de CV de 5 variables sur les 7 étudiées sont supérieures au seuil de 15% (C total, C organique, N total, N minéral et P Olsen). Pour les microparcelles, 2 des 7 variables physico-chimiques ont un CV supérieur au seuil (N total et N minéral). Pour les variables microbiologiques (**Figure 16 B**), sur les parcelles agriculteurs, les valeurs médianes de CV de 5 variables sur les 8 étudiées sont supérieures au seuil de 25% (ADN total, ADNr 18S, ADNr 16S, arylamidase et arylsulphatase).

Globalement, la variabilité spatiale des variables mesurées est plus faible sur les microparcelles. Ce résultat était attendu puisque les répétitions en microparcelles sont constituées par des bandes dans le même pédoclimat alors que les répétitions en parcelles agricoles correspondent chacune à une parcelle agricole différente. Bien que pour les microparcelles toutes les variables ont un CV médian inférieur au seuil, seuls l'azote minéral et total ont présenté une variabilité spatiale importante. Cette variabilité pour ces deux paramètres a déjà été observée par ailleurs sur d'autres sols (Długosz et Piotrowska-Długosz, 2016 ; Bukomba et Lusk, 2022).

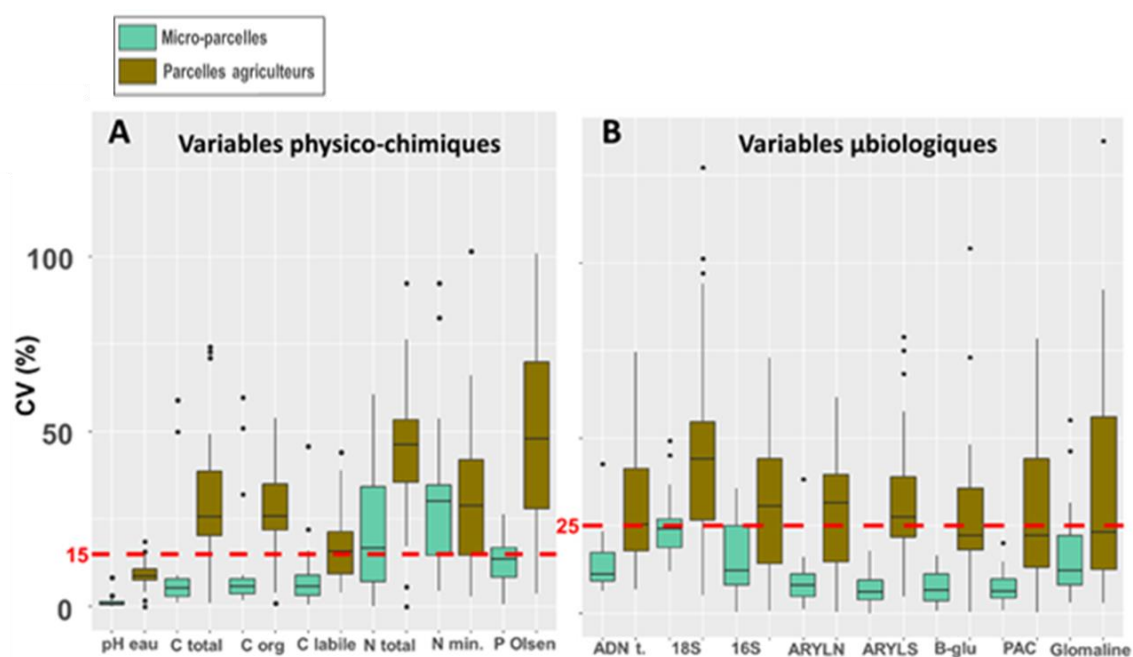


Figure 16 : Boxplots du coefficient de variation (%) pour les variables physico-chimiques (A) et microbiologiques (B).

5.1.1.4. Variabilité temporelle des variables mesurées

La variabilité temporelle des variables mesurées a été étudiée en comparant la valeur de chaque variable mesurée entre les 3 dates de prélèvement pour chaque culture. Cette analyse a été menée par pédoclimat pour les microparcelles et par type de travail du sol pour les parcelles agriculteurs. Les résultats présentés dans la **Figures 17** montrent la forte variabilité temporelle de l'ensemble des paramètres mesurés dans les microparcelles et les parcelles agriculteurs.

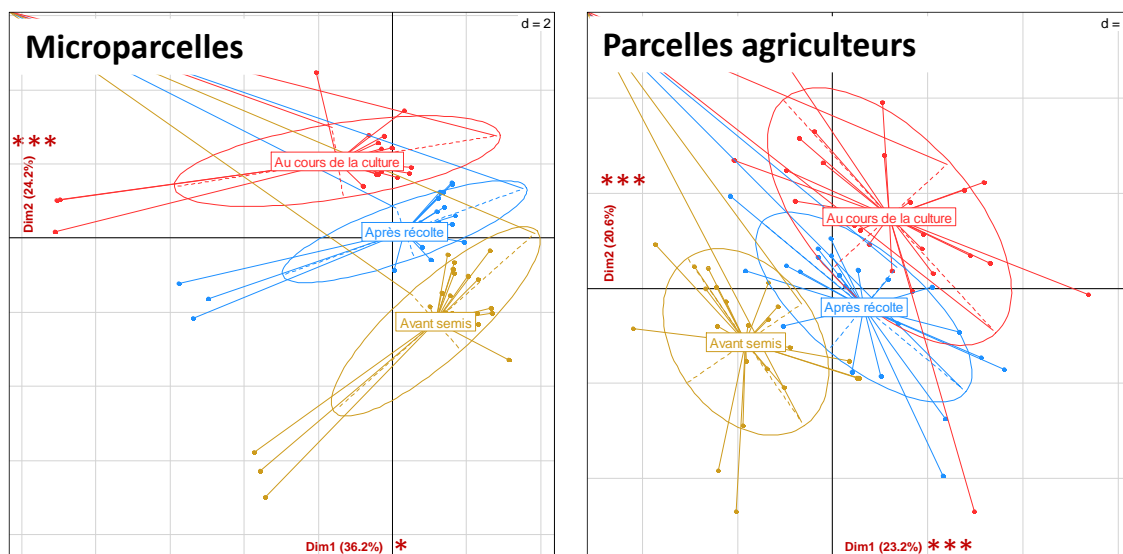


Figure 17 : Variabilité temporelle des variables mesurées dans les sols en microparcelles et en parcelles agricoles

L'analyse détaillée de cette variabilité temporelle est synthétisée dans le **Tableau 8** et détaillée en **Annexe 3** (microparcelles). Les résultats montrent globalement en microparcelles un effet date de prélèvement très marqué sur l'ensemble des variables mesurées hormis le P Olsen dans l'Eure. Pour les parcelles agricoles, cette variabilité temporelle est plus prégnante pour les variables microbiologiques que les variables physicochimiques. Cette variabilité temporelle des indicateurs mesurés est en lien avec les variations saisonnières de température et d'humidité du sol entre les 3 dates de prélèvement. En effet, l'étude des relations entre l'humidité du sol frais au moment du prélèvement et les valeurs des variables mesurées, par les corrélations de Pearson illustre cet effet (**Annexe 4**). Ces corrélations mettent en évidence une relation positive notamment entre l'humidité du sol et les activités enzymatiques en Seine-Maritime et avec la biomasse fongique dans l'Eure. Pour les parcelles agricoles, l'effet de l'humidité a varié entre le labour et le non-labour (**Annexe 5**).

		Microparcelles						Parcelles agriculteurs					
		Eure			Seine-Maritime			Labour			Non labour		
Variable		Lupin	Lentille	Pois	Féverole	Lupin	Pois	Féverole	Lupin	Lentille	Pois	Féverole	Quinoa
Variables physico-chimiques	Humidité sol frais (%)												
	pH eau												
	C total (%)												
	C org (%)												
	Carbone oxydé KMnO4 (mg/kg)												
	N total (%)												
	N minéral (mg/kg)												
	P Olsen (mg/kg)												
Variables microbiologiques	ADN total (µg/g)												
	ADN 18S (copies 18S /g)												
	ADN 16S (copies 16S /g)												
	Arylamidase (nmol/min/g)												
	Arylsulfatase (nmol/min/g)												
	Béta-Glucosidase (nmol/min/g)												
	PAC (nmol/min/g)												
	Glomaline (mg/g)												

Tableau 8 : Effet date de prélèvement du sol sur chaque variable physico-chimique et microbiologique mesurée. Pour les microparcelles, l'effet date est étudié par culture et par pédoclimat et pour les parcelles agriculteurs par culture et par mode de travail du sol.

En plus de cette variabilité temporelle, la texture du sol semble être un autre facteur explicatif de la variabilité des indicateurs mesurés en microparcelles et en parcelles agriculteurs (**Figure 18**). Par ailleurs, le mode du travail du sol, ne semble pas être un facteurs explicatif de la variabilité des indicateurs dans les parcelles agriculteurs.

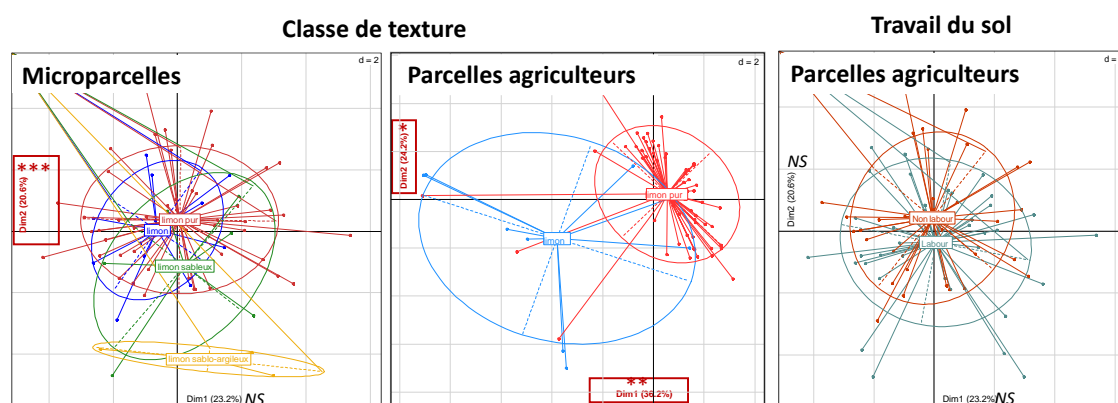


Figure 18 : Effet de la classe de texture du sol et du mode de travail du sol sur chaque variable physico-chimique et microbiologique mesurée en microparcelles et parcelles agriculteurs.

Nos résultats ont finalement révélé une forte variabilité spatiale et temporelle qui peut s'expliquer par plusieurs facteurs liés aux caractéristiques physicochimiques du sol et aux temps d'échantillonnage. Dans notre étude les sols des parcelles étudiées présentent de légères différences de texture. Conformément à nos résultats, plusieurs auteurs ont rapporté l'effet significatif du pédoclimat sur les paramètres physicochimiques et biologiques des sols (Castellanos et al., 2009; Laval et al., 2009; Piotrowska-Dlugosz et al., 2020). D'ailleurs une étude récente a montré que le type de sol et la

fréquence des précipitations sont plus importants dans le déterminisme des communautés microbiennes du sol et leur fonctions que les rotations de cultures (Schlatter et al., 2019).

5.1.2. Effet de l'implantation des cultures riches en protéines (légumineuses)

5.1.2.1. En microparcelles

Pour évaluer l'effet de l'implantation des légumineuses (pois, lentille, lupin et féverole) sur l'état biophysicochimique du sol, nous avons étudié l'évolution de l'état des sols entre la première date de prélèvement, avant l'implantation des légumineuses correspondant au stade avant semis et la seconde date de prélèvement, au cours du cycle cultural correspondant au stade avant récolte.

L'implantation des légumineuses a induit une modification de l'état des sols. En effet, si le taux de P Olsen et C labile et l'activité enzymatiques arylsulphatase ne montrent pas de forte variation (**Annexe 6**), des augmentations significatives dans le taux de C organique, les niveaux d'activités (arylamidase, β -glucosidase et phosphatase acide) ainsi que les profils enzymatiques (MGea) ont été observées pour toutes les cultures et dans les deux pédoclimats (Eure et Seine Maritime) (**Figure 19**).

L'azote minéral ainsi que les biomasses totale, bactérienne et fongique ont montré une diminution significative suite à l'implantation des légumineuses. Le ratio F/B n'a présenté aucune variation (**Figure 20**).

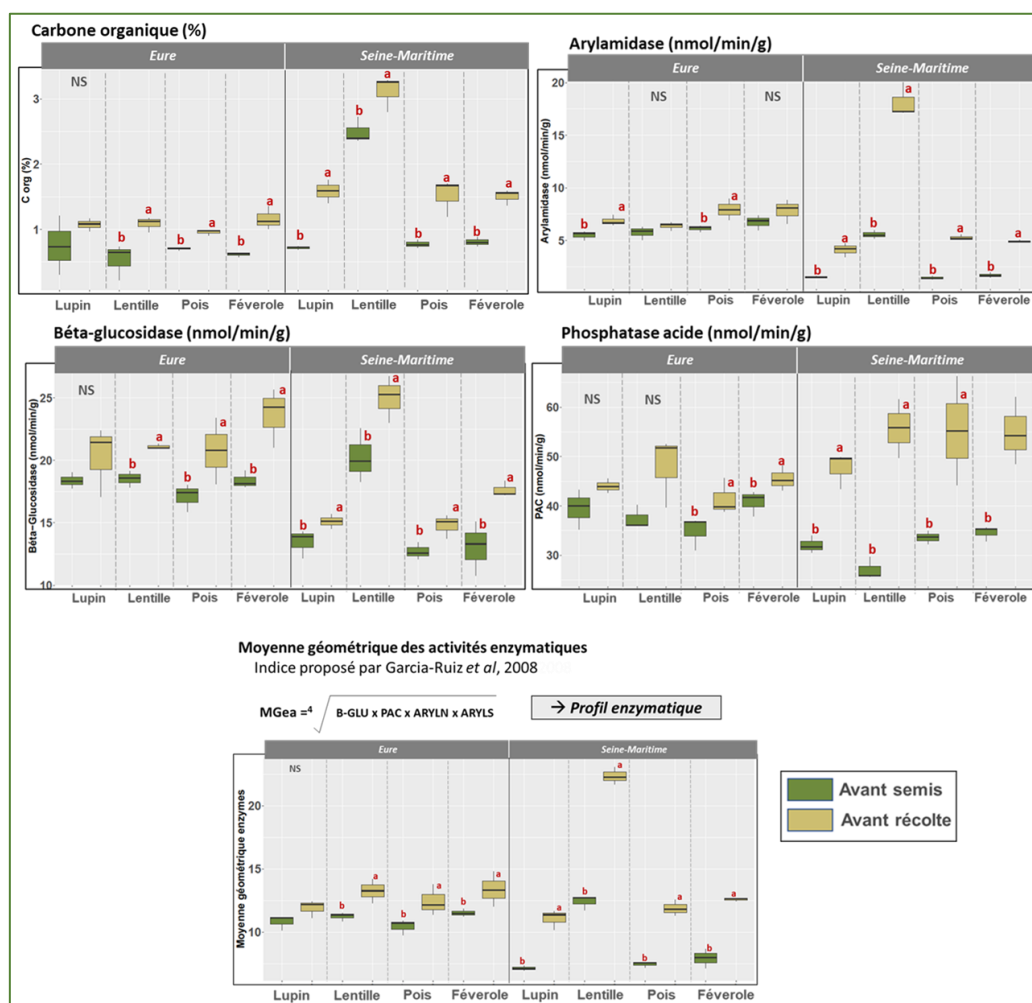


Figure 19 : Effet de l'implantation des légumineuses sur C organique, le niveau des activités et le profil enzymatiques dans les sols des microparcelles dans l'Eure et dans la Seine-Maritime

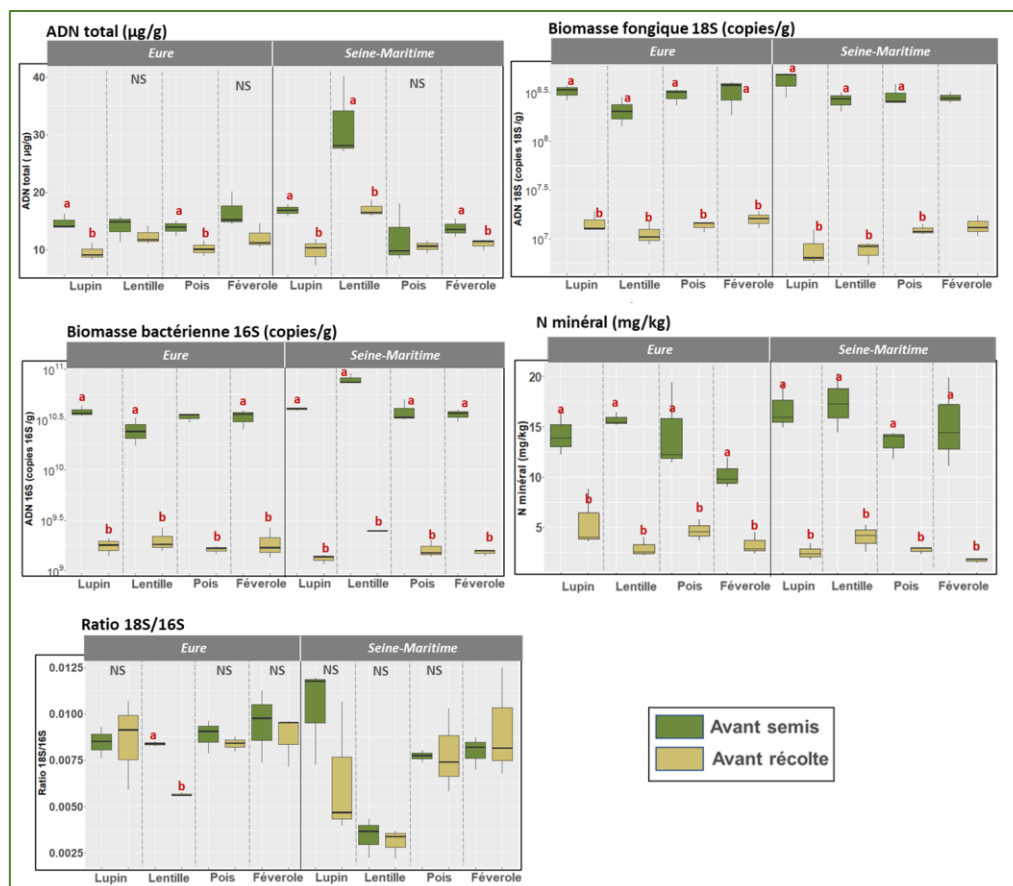


Figure 20 : Effet de l'implantation des légumineuses sur l'azote minéral et les biomasses (totale, bactérienne et fongique) et le ratio F/B dans les sols des microparcelles dans l'Eure et dans la Seine-Maritime

Les résultats obtenus illustrent l'effet de l'implantation des légumineuses sur les statuts physicochimique et biologique du sol. La diminution du N minéral dans le sol est attendue. En effet, les plantes sont connues pour utiliser l'azote minéral disponible pour leur nutrition (Morot-Gaudry et al., 2014). Un autre facteur explicatif pourrait être le besoin en azote des communautés microbiennes, qui peuvent utiliser l'azote disponible du sol pour leur croissance (Yevdokimov et al., 2005; Yansheng et al., 2020). Cette immobilisation ou organisation nette de l'azote traduit une diminution du taux d'azote minéral dans le sol. La diminution du N minéral s'est accompagnée par une diminution de l'abondance des communautés microbiennes. Ce pattern de variation pourrait s'expliquer par la relation entre l'azote minéral et les biomasses qui semblent corrélées positivement entre eux ($r > 0.6$). Par ailleurs, l'évolution du C organique et du profil enzymatique met en exergue l'effet du développement du couvert et de l'installation d'une rhizosphère (Keiblinger et al., 2010; Geyer et al., 2016; Tian et al., 2020). Cet effet est d'autant plus important lorsqu'on s'intéresse à la diversité fonctionnelle potentielle des bactéries des sols et à l'activité symbiotique de ces légumineuses. Si la littérature rapporte l'effet positif des légumineuses qui contribuent à augmenter les pools de carbone dans le sol et l'abondance des populations microbiennes du sol (Roux et al., 2013; Venter et al., 2016), l'ensemble des résultats acquis ici n'ont pas permis de confirmer cet effet positif sur les biomasses bactériennes et fongiques.

- La diversité fonctionnelle potentielle par le système Biolog en microparcelles

La diversité fonctionnelle potentielle permet d'estimer les potentielles des bactéries cultivables du sol à dégrader certains substrats carbonés avec différentes complexités. Cette activité de dégradation

renseigne sur la capacité fonctionnelle des communautés bactériennes d'un sol à dégrader la matière organique. Cette diversité fonctionnelle potentielle des bactéries cultivables du sol a été évaluée par le système Biolog (Calbrix et al., 2005). Les résultats montrent que l'activité métabolique moyenne (Average well color development, AWCD) est nettement supérieure après implantation des légumineuses comparativement au stade avant semis. Cet effet est plus marqué dans l'Eure, même si les tendances confirment cette augmentation en seine Maritime (**Figure 21**). L'analyse détaillée du profil de dégradation des substrats présents dans la microplaque Biolog, montre que le nombre de substrats dégradés et l'intensité de dégradation est plus importante suite à l'implantation des légumineuses. Ce résultat est confirmé par l'indice de diversité Shannon-Weiner (H')

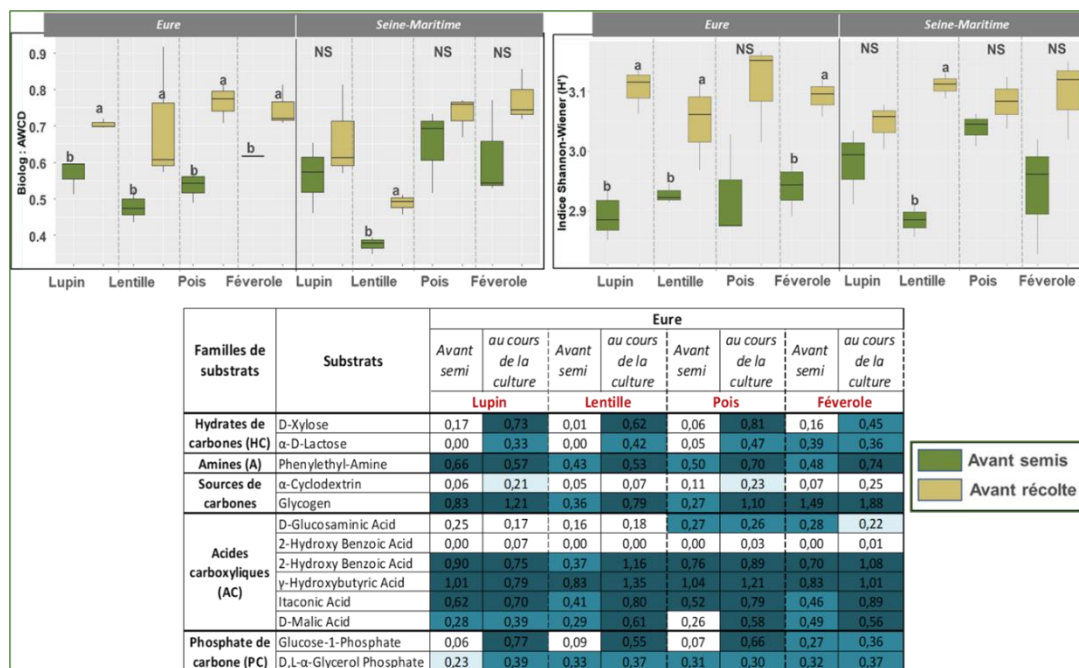


Figure 21 : Effet de l'implantation des légumineuses sur le niveau et le profil de la diversité fonctionnelle potentielles dans les sols des microparcelles dans l'Eure et dans la Seine maritime

5.1.2.2. En parcelles agriculteurs

L'effet de l'implantation des légumineuses sur l'état bio-physicochimique du sol en parcelles agriculteurs, montre pour les deux modes de travail du sol (labour et non-labour) dans l'ensemble peu de variation entre le stade avant semis et avant récolte des cultures pour le P Olsen, le C organique ainsi que les biomasses totale et bactérienne, tandis que le taux de C labile a augmenté (**Figure 22**).

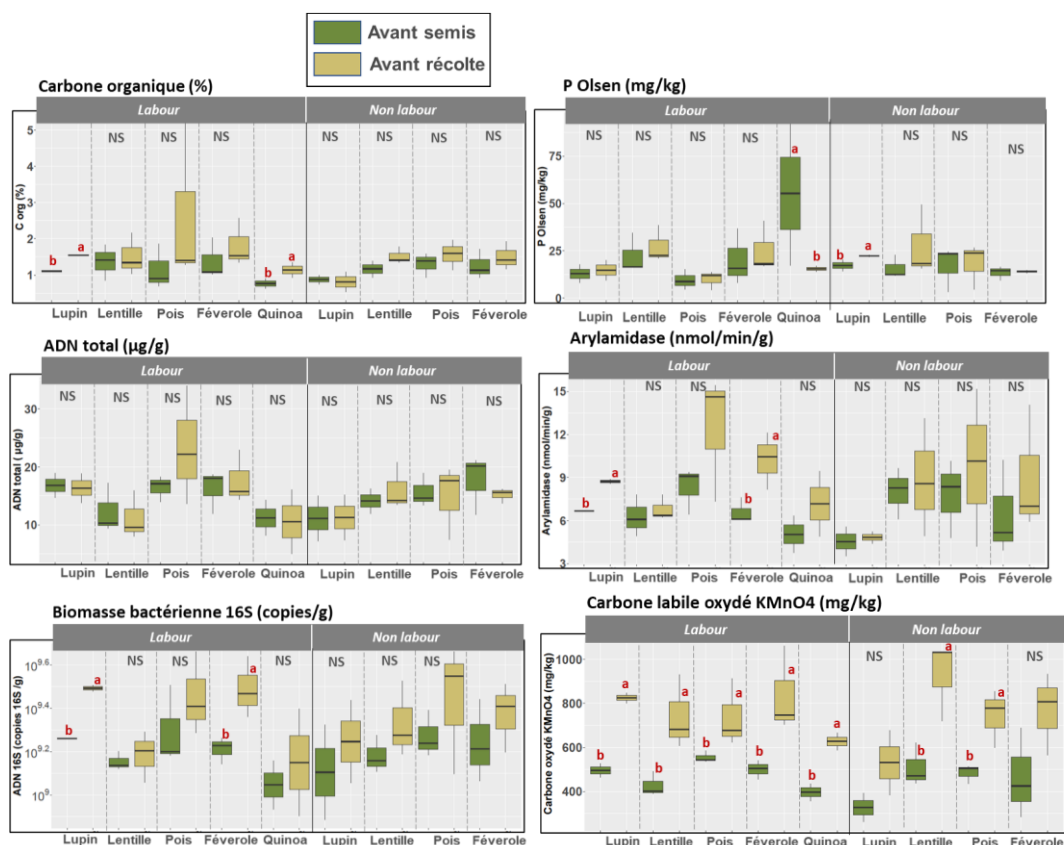


Figure 22 : Effet de l'implantation des légumineuses et du quinoa sur C organique, P Olsen, les biomasses (Total et bactérienne), l'arylamidase et le C labile dans les sols des parcelles agriculteurs en labour et non labour

Une diminution significative de l'abondance de la biomasse fongique, les niveaux d'activités enzymatiques et MGea ainsi que l'azote minéral a été observée pour toutes les cultures en labour et non labour (**Figure 23**). L'analyse des corrélations (**Annexe 5**) montre une relation positive entre N min, biomasse fongique et activités enzymatiques ce qui peut expliquer leur parton de variation. La diminution de l'azote minéral dans le sol répond aux besoins de nutrition des cultures et des microorganismes (Morot-Gaudry et al., 2014; Yansheng et al., 2020). D'ailleurs la diminution des activités enzymatiques suggère une fourniture en éléments nutritifs suffisante; puisque dans ce cas précis, les activités enzymatiques qui sont corrélées entre elles semblent non corrélées au statut organique du sol. Par ailleurs, la corrélation négative entre le taux de C labile et l'abondance fongique suggèrent un lien entre l'abondance des champignons et la qualité du C organique dans le sol.

Moyenne géométrique des activités enzymatiques
Indice proposé par Garcia-Ruiz *et al.*, 2008

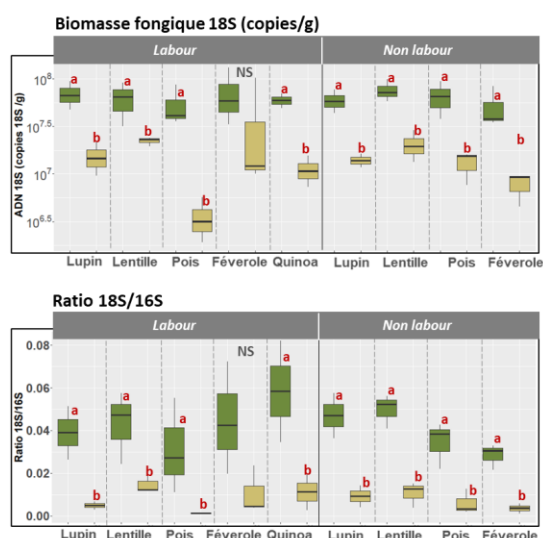
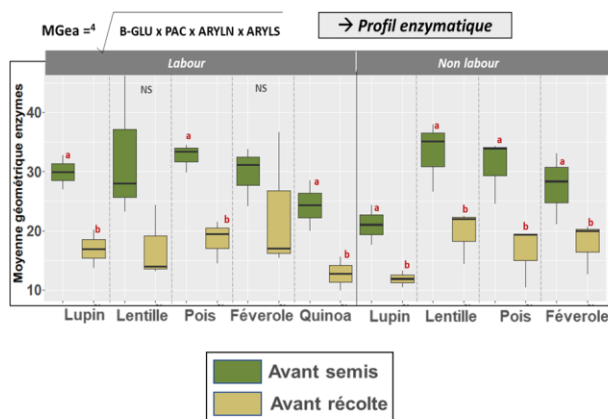


Figure 23 : Effet de l'implantation des légumineuses du quinoa sur la biomasse fongique, le ratio F/B et le profil enzymatique dans les sols des parcelles agriculteurs en labour et non labour

- L'activité symbiotique des cultures étudiées

En microparcelles

L'activité symbiotique qui renseigne sur la capacité des légumineuses à réaliser une symbiose avec les champignons mycorhiziens et notamment avec les champignons endomycorhiziens a été évaluée. Les résultats montrent pour les deux paramètres intensité de mycorhization et abondance arbusculaire, les mêmes tendances même si les taux déterminés restent faibles (**Figure 24**). L'intensité de mycorhization ne semblent pas différencier les cultures entre-elles dans l'Eure, cependant des différences significatives sont observées entre la lentille (qui présente les taux les plus élevés) et les autres cultures de légumineuses en Seine Maritime. Dans l'ensemble cette faible activités symbiotique est expliquée par les pratiques culturales, il s'agit du travail du sol et du précédent cultural. En effet, toutes les parcelles ont été travaillées soit à 25 ou 15 cm de profondeur ce qui induit une diminution des hyphes mycéliens et du potentiel de mycorhization des plantes, tel que rapporté dans la littérature. Le régime de travail du sol est caractérisé par sa fréquence, sa profondeur et le retournement du sol, qui perturbe fortement les communautés microbiennes, qui se trouvent principalement dans les premiers centimètres à la surface du sol (Bissett *et al.*, 2011). Le labour induit des changements drastiques dans les communautés microbiennes et leurs activités, qui peuvent persister longtemps (Sun *et al.*, 2018; Xia *et al.*, 2019; Kraut-Cohen *et al.*, 2020). En effet, le labour conventionnel entraîne une diminution fongique en détruisant essentiellement les hyphes de ces derniers (Bittman *et al.*, 2005; Tian *et al.*, 2013; Hartman *et al.*, 2018; Schmidt *et al.*, 2018; Xia *et al.*, 2019). Le précédent cultural moutarde pour pois, fèverole et lupin explique lui aussi ce faible taux de mycorhization. En effet, certaines cultures appartenant au Braciacées comme le colza, ou encore la moutarde ne sont pas mycorhizogènes et peuvent réduire la colonisation des racines de la culture suivante par les champignons mycorhiziens arbusculaires (White and Weil, 2010; Koide and Peoples, 2012). La rhizosphère des racines vivantes de ces plantes libère un composé de type fumigant (2-phényléthyl isothiocyanate), qui affecte considérablement la structure des communautés bactériennes et fongiques ainsi que les fonctions liées au cycle des éléments nutritifs (Rumberger and Marschner, 2003; Hu *et al.*, 2015). Les activités symbiotiques importantes obtenues pour la lentille en Seine Maritime s'expliquent par un précédent cultural différent par rapport aux pois, fèverole et lupin et qui

correspondait à un mélange de couvert (vesces, avoine, moutarde, fascélie et lin) qui favorise la mycorhization.

En parcelles agriculteurs

Ici l'activité symbiotique est faible pour les cultures en labour (**Figure 24**). Bien que faible, l'intensité de mycorhization a varié significativement entre les cultures en labour mettant en avant trois clusters : 1) Lupin, 2) lentille et pois, et enfin 3) la fêverole et le quinoa. L'activité symbiotique bien que faible dans les parcelles agriculteurs, elle reste néanmoins supérieure à celles des microparcelles. En effet, ces dernières cumulent l'effet combiné du précédent cultural et du labour, alors les parcelles agriculteurs avec un précédent céréale (dans la majorité des cas), favorise la colonisation des racines par les champignons mycorhiziens. En non-labour, l'activité symbiotique des cultures était 2 fois supérieure comparativement au labour. La lentille a présenté l'activité la plus élevée (60%) et significativement différente de l'activité symbiotique des autres cultures qui n'ont pas présenté de différence entre-elles. Dans la littérature la comparaison entre l'effet du labour et du non-labour sur les communautés microbiennes du sol est bien documentée. En effet, les sols non labourés présentent une biomasse microbienne supérieure de + 20 à + 60 % comparativement aux sols labourés (Panettieri et al., 2014). Ce résultat est lié à une augmentation de la biomasse fongique qui résulte de l'accumulation de la matière organique du sol et une légère acidification en surface, qui favorise la prolifération des champignons (Pastorelli et al., 2013; Geisseler and Scow, 2014). Nos résultats illustrent bien l'effet positif du non-labour sur l'activité symbiotique.

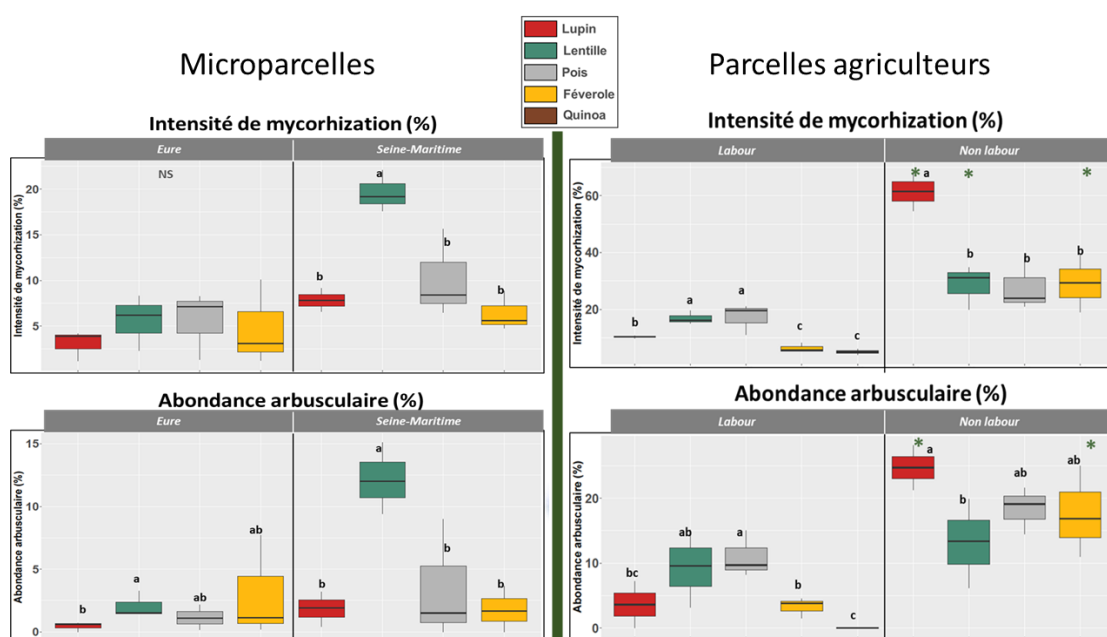


Figure 24 : Effet de l'implantation des cultures riches en protéines sur l'activité symbiotiques dans les sols des microparcelles dans l'Eure et la Seine Maritime et dans les parcelles agriculteurs en labour et non labour

Bien que les résultats obtenus en microparcelles ou en parcelles agriculteurs ont montré que l'implantation des légumineuses modifient l'état physicochimique et biologique du sol. Le type de culture en place ne semble pas être un facteur explicatif de la modification de l'état du sol. En effet, la classification ascendante hiérarchique présenté dans la **Figure 25**, ne montre pas de regroupement de culture par type de culture, que ce soit en microparcelles (Eure, **annexe 7** et Seine Maritime, **Figure 25**) ou en parcelles agriculteurs (en labours, **Figure 25** et en non-labour, **annexe 8**). Le cluster de lentille

en microparcelles en Seine Maritime est lié au fait que la lentille est cultivée sur un sol argileux-calcaire, différent du sol des autres cultures.

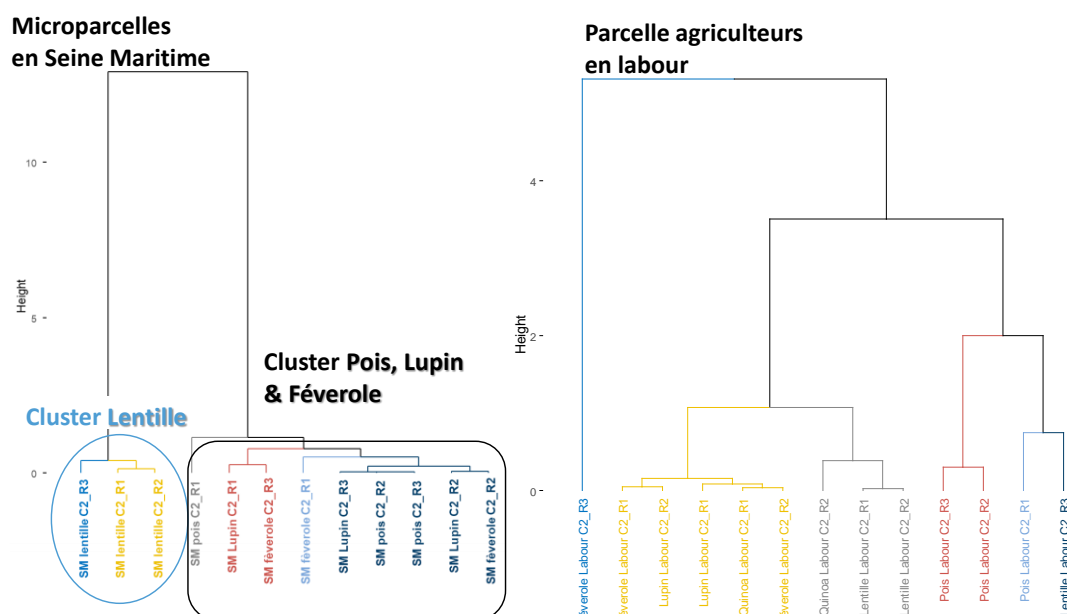


Figure 25 : Classification ascendante hiérarchique pour tester l'effet type de culture dans les sols des microparcelles dans la Seine Maritime et dans les parcelles agriculteurs en labour

5.1.3. Performance des cultures étudiées dans un contexte Normand

Les deux critères pris en compte pour l'évaluation de la performance des cultures en microparcelles et en parcelles agriculteurs sont les critères de quantité de rendement et de qualité de la récolte.

5.1.3.1. En microparcelles

Pour chaque culture de légumineuse, le rendement réalisé est exprimé en pourcentage de l'objectif de rendement, ce qui permet de définir des classes de rendement réalisé. L'objectif de rendement pour une culture donnée est calculé sur la moyenne olympique des rendements des 5 dernières années, c'est-à-dire en ne prenant pas en compte l'année la moins productive et la plus productive. Les classes de rendement réalisé (en % de l'objectif de rendement) correspondent à :

- Rendement entre 15 et 35% : très faible
- Rendement entre 30 à 60% : faible
- Rendement équivalent à 100% : correct
- Rendement entre 100 à 115% : bon
- Rendement supérieur à 115% : très bon

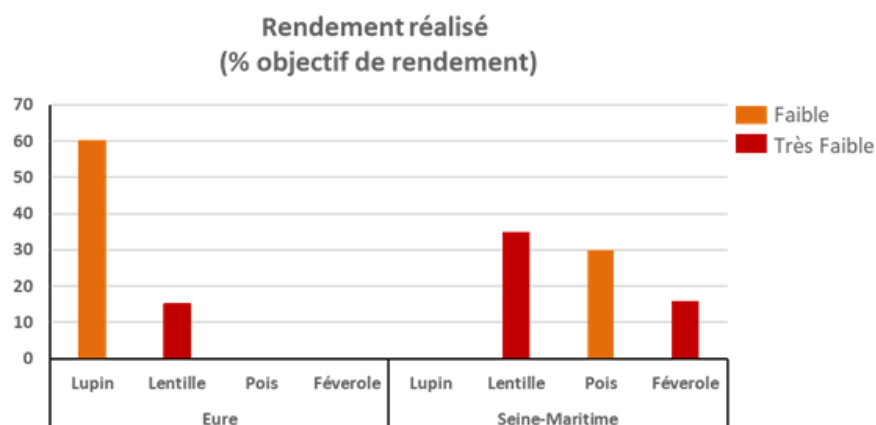


Figure 26 : Rendement réalisé dans chaque pédoclimat et pour chaque culture de légumineuses en microparcelles

Les rendements des légumineuses dans les 2 pédoclimats sont compris entre 0 (non récolté) et 60% de l'objectif de rendement ce qui correspond à des rendements nuls à faibles (**Figure 26**). En effet, les cultures récoltées dans l'Eure sont le lupin et la lentille et celles récoltées en Seine maritime sont lentille, pois et fèverole avec des taux de rendement très faibles dans les deux départements. Les autres cultures n'ont été récolées. L'analyse du taux de protéines dans les graines a été réalisée pour la lentille de seine Maritime et le lupin de l'Eure. Les taux de protéines retrouvées étaient de 23.5% pour la lentille et 34.7% pour le lupin, ce qui est faibles comparativement à ce qui est retrouvé habituellement pour les graines de ces cultures à savoir 26% et 40% respectivement.

5.1.3.2. En parcelles agriculteurs

le rendement réalisé est exprimé en pourcentage du rendement moyen pour la région et l'année donnée, selon Agreste. Cette valeur de rendement réalisé (% rendement moyen) a permis de définir les classes de rendement suivantes :

- o Rendement très faible (<50%)
- o Rendement faible à moyen (50% ;75%)
- o Rendement moyen à élever (75% ;100%)
- o Rendement très élevé (>100%)

Les résultats montrent des rendements très variables classés de très faible à moyen aussi bien en labour qu'en non-labour pour toutes les cultures (**Figure 27**). Le critère de qualité est basé sur l'appréciation de qualité de la récolte par les agriculteurs. Dans l'ensemble la qualité des rendements était plutôt moyenne. Deux cultures ont présenté une bonne qualité il s'agit du pois et du quinoa, conduit labour.

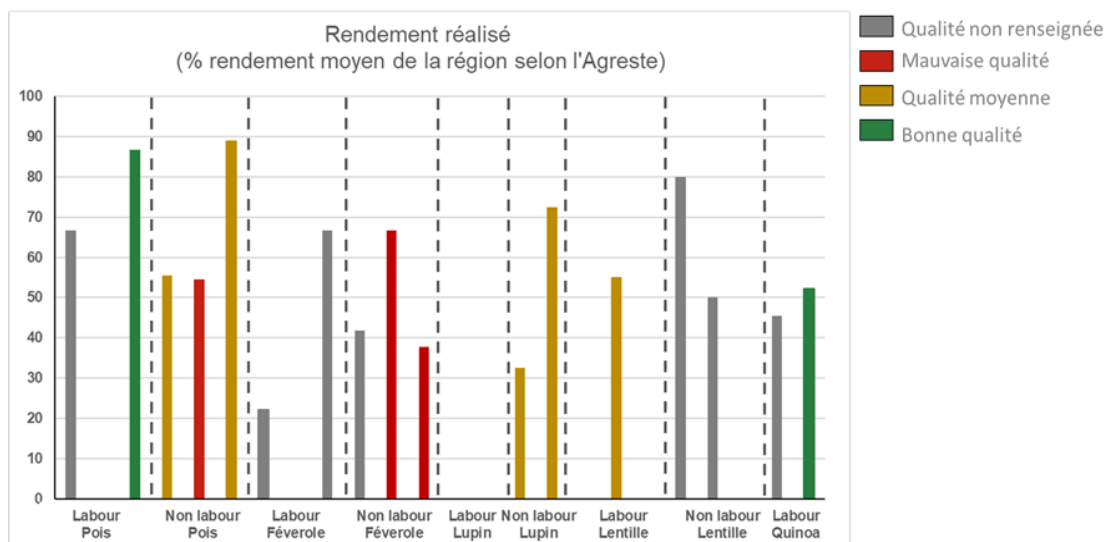


Figure 27 : Rendement réalisé par parcelle agricole en 2021. Les couleurs se rapportent au niveau de qualité de la récolte

Les taux de rendements faibles voir nuls peuvent être liés aux conditions climatiques (météorologiques) de l'année. En effet, pour les cultures de printemps étudiées dans le projet PROVEG, les semis ont lieu dans de bonnes conditions de fin février à la mi-mars 2021. En suite de fortes variations de températures, accompagnées par un temps sec, ont pu potentiellement limiter la mise en place des nodosités pour les légumineuses et donc par la suite la nutrition azotée des plantes. Les gelées du mois d'avril ont induit des gels d'apex, notamment pour le pois.

Les fortes chaleurs ressenties début juin et les pluies qui ont suivies ont eu un impact important sur le rendement, favorisant l'apparition de nombreuses maladies (sclérotinia, oïdium, botrytis, rouille, anthracnose). Certains couverts très denses se retrouvent plaqués au sol, et pourrissent faute de pouvoir sécher, ça a été notamment le cas pour la culture de lupin. L'impact sur la qualité des graines a été important et dans certains cas, les récoltes ont été retardées et rendues difficiles par l'humidité. Les rendements sont dans l'ensemble décevants.

Afin d'évaluer si les taux de rendement sont impactés par les pratiques culturales, une typologie des pratiques des systèmes de culture a été définie à partir de l'ensemble des pratiques étudiées en prenant en compte les itinéraires techniques de l'année de l'implantation des cultures (année n) et l'année précédente (année n-1) (Figure 28).

Pratiques culturales étudiées :

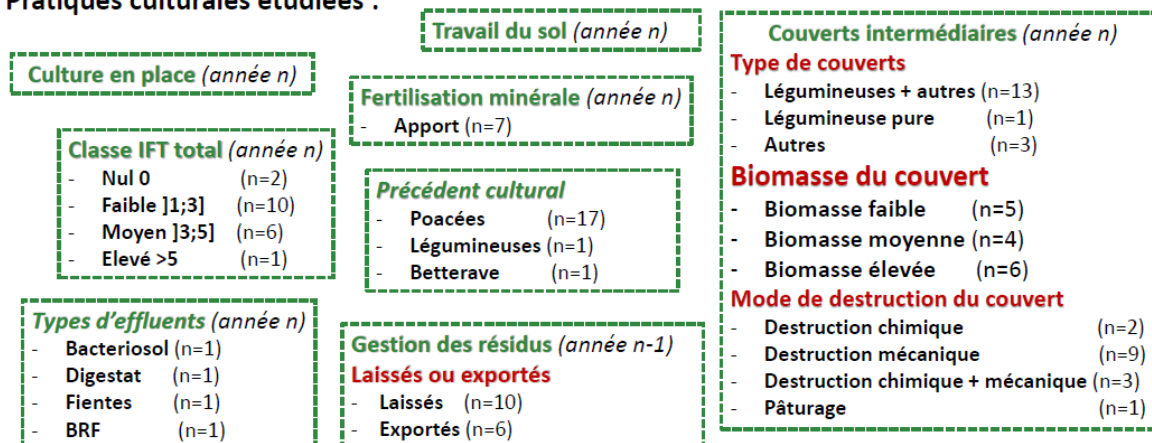


Figure 28 : Pratiques culturales étudiées sur les 19 parcelles agricoles avec rendement renseigné l'année du prélèvement. Ces pratiques ont été étudiées en analysant leur impact potentiel sur le rendement réalisé

L'analyse de l'ensemble des facteurs liés à la pratique ont été inclus dans une Analyse des Correspondances Multiples (ACM). Les résultats de cette analyse sont présentés dans la **Figure 29**. L'ACM met en évidence que les rendements très faibles à moyens obtenus en 2021 ne sont pas dépendants de la typologie du système de culture et donc des pratiques culturales mises en œuvre par les agriculteurs et notamment le type de travail du sol (labour et non labour).

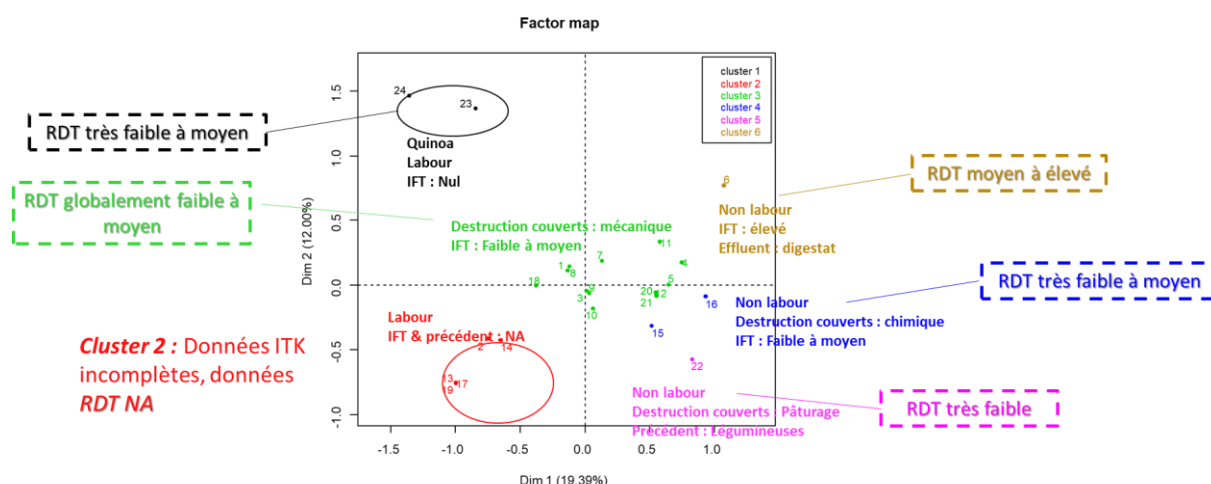


Figure 29 : Analyse des Correspondances Multiples (ACM) sur les pratiques culturales de 19 parcelles agricoles (avec rendement année n renseigné). Les pratiques culturales prises en compte sont celles de l'année du prélèvement (culture en place, fertilisations organique et minérale, IFT total et couverts intermédiaires) et de l'année $n-1$ (culture en place et gestion des résidus). Les rendements indiqués dans les encadrés en pointillés sont ceux de l'année du prélèvement.

5.1.4. Relation entre l'état du sol et la performance des cultures

Afin d'étudier les relations entre les indicateurs physico-chimiques et microbiologiques mesurés dans les sols et les rendements obtenus en microparcelles et parcelles agriculteurs, une analyse globale a été menée sur l'ensemble des données acquises sur les 3 campagnes d'échantillonnage de suivi des microparcelles et des parcelles agriculteurs. Pour cela, les corrélations de Spearman ont été étudiées. Les résultats des corrélations de Spearman (**Figure 30 A**) mettent en évidence des relations positives significatives entre certains paramètres physico-chimiques du sol et les rendements obtenus. En effet, plus les teneurs du sol en carbone (carbone total, carbone organique et carbone labile) sont élevées, plus le rendement des cultures est élevé. Des relations positives fortes sont également observées entre le rendement et l'intensité de mycorhization et l'abondance arbusculaire (**Figure 30 B**). Cette relation positive entre l'activité symbiotique et le rendement suggère un effet bénéfique du taux de mycorhization des racines des cultures sur leur rendement et met ainsi en exergue le rôle majeur de ces communautés fongiques dans la nutrition et la santé des plantes.

Des travaux menés au laboratoire AGHYLE dans le cadre de la thèse de Mohamed Kanté (**soutenue le 13 juillet 2022**) ont mis en évidence l'effet des flux de carbone de la plante vers le sol et confirment l'impact de ces flux sur les activités enzymatiques des sols et la structure des communautés bactériennes et fongiques rhizosphériques impliquées dans l'assimilation du C rhizodéposé par une légumineuse, la féverole. L'étude de la structure des communautés microbiennes réalisée par la technique du DNA SIP (DNA stable isotope probing) permettant la distinction, entre l'ADN des microorganismes métaboliquement actifs et celui des microorganismes non impliqués ou dormants (Radajewski et al., 2000) montre que les exsudats de la féverole permettent le recrutement d'une communauté active plus abondante et plus diversifiée par rapport à une céréale par exemple. Cet effet

de la féverole particulièrement marqué peut s'expliquer par la quantité et la qualité des exsudats racinaires, qui sont très riches en acides organiques et aminés (Siczek et al., 2018, 2020) pouvant favoriser des microorganismes particuliers comme les *Pseudomonas* et les *Archaeospora* capables de cataboliser les acides organiques et de solubiliser le P dans le sol (Hafidi et al., 2013; Panhwar et al., 2013; Wahbi et al., 2016). Le genre *Archaeospora* affilié aux Gloméromycètes abrite différentes espèces de champignons mycorhiziens (Bulgarelli et al., 2013; Redecker and Schüßler, 2014). Ces espèces sont très actives dans l'assimilation du C exsudé, améliorent l'absorption des nutriments par les plantes et augmentent la résistance aux maladies (Sharma and Gupta, 2014; Hugoni et al., 2018; Jadallah and ALsaadi, 2021). Dans la rhizosphère de la féverole, la forte diversité des microorganismes actifs comme les genres bactériens *Pseudomonas* et *Noviherbaspirillum*, et fongique *Archaeospora* est associée aux traits fonctionnels, notamment une forte croissance de la plante. Cette relation positive est cohérente avec les fonctions bénéfiques attribuées à ces genres et notamment sur la croissance et la santé des plantes (Soltani et al., 2010; Santoyo et al., 2012; Thomloui et al., 2019; Menon et al., 2020). Dans le cadre du projet PROVEG, L'analyse des corrélations a montré une relation positive entre le rendement et certains paramètres microbiologiques des sols. C'est le cas des activités enzymatiques des cycles des C, N, P et S (B-Glucosidase, arylamidase, phosphatase acide et arylsulphatase) et le ratio F/B (champignons / bactéries) ce qui confirme une fois encore le rôle positif de la biomasse fongique et plus largement l'état biologique du sol sur le rendement.

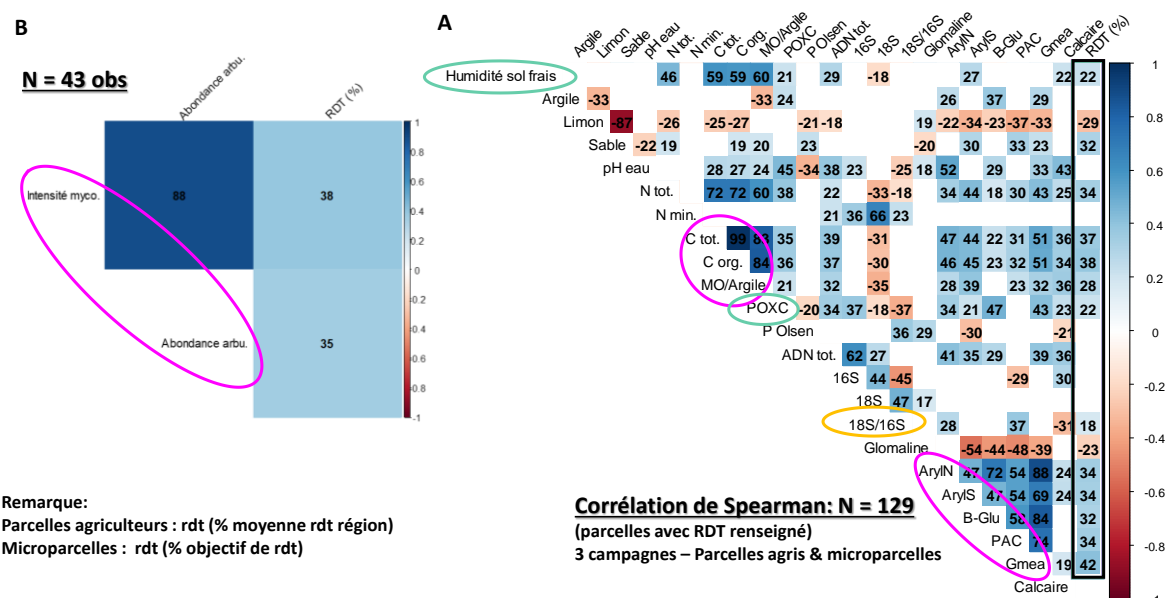


Figure 30 : A) Matrice des corrélations de Spearman sur les données des 3 campagnes de prélèvement, en microparcelles et parcelles agriculteurs (n = 129 observations). B) Matrice des corrélations de Spearman sur les données de la deuxième campagne (au cours de la culture).

5.1.5. Evaluation de la durabilité des systèmes de culture incluant une légumineuse mis en place chez les agriculteurs

Des profils de durabilité ont été établis pour chaque système de culture mis en place par l'agriculteur sur la parcelle suivie dans l'action 1 et sont présentés de façon synthétique dans le **Tableau 9**.

Tableau 9 : Profils de durabilité obtenus avec l'outil Masc 2.0. Plus la couleur est verte, plus le système de culture est durable sur le critère considéré et inversement plus la couleur est rouge et moins le système de culture est durable sur ce critère

Culture	Travail du sol	Contribution développement durable	Dimension économique	Résultats économiques	Capacité productive à long terme	Contribution développement éco	Dimension sociale	Satisfaction attentes agri	Satisfaction attentes société	Dimension environnementale	Qualité des milieux	Pressions sur ressources abiotiques	Biodiversité
Pois	Labour												
Pois	Labour												
Pois	Labour												
Pois	Labour												
Pois	Non labour												
Pois	Non labour												
Féverole	Labour												
Féverole	Labour												
Féverole	Labour												
Féverole	Non labour												
Féverole	Non labour												
Féverole	Non labour												
Lupin	Labour												
Lupin	Non labour												
Lupin	Non labour												
Lentille	Non Labour												
Lentille	Non Labour												
Lentille	Non Labour												
Quinoa	Labour												
Quinoa	Labour												

On observe autant de profils de durabilité que de systèmes étudiés. On remarque toutefois quelques tendances :

- Plus de la moitié des systèmes de culture présentent une faible durabilité.

Les systèmes de culture avec pois et quinoa semblent mieux s'en sortir mais les effectifs sont trop faibles pour considérer que le type de légumineuse influence le profil de durabilité.

5.1.5.1. Concernant la dimension économique

On n'observe pas de tendance pour cette dimension, la moitié des systèmes étant jugé durable et l'autre moitié non durable. Toutefois, la majorité des systèmes (15 systèmes sur 20) présente une note positive en termes de "capacité productive à long terme". La capacité productive à long terme traduit la maîtrise de la fertilité physicochimique (état structural, pH et fertilité phospho-potassique) et des bioagresseurs inféodés à la parcelle. Ces résultats s'expliquent en partie du fait de la diversité des cultures présentes dans la rotation, l'introduction de légumineuses contribuant à augmenter cette diversité.

A l'inverse, très peu de systèmes sont identifiés comme durables pour le critère "contribution au développement économique" qui repose sur la contribution à l'émergence de nouvelles filières et à la qualité des produits. C'est notamment ce dernier point qui tend à faire basculer le critère en rouge. Attention, les données économiques n'étant pas disponibles pour 14 systèmes sur 20, les agriculteurs n'ayant pas souhaité les donner, il faut rester prudent sur l'analyse de la durabilité de la dimension économique.

5.1.5.2. Concernant la dimension sociale

Cette dimension présente pour quasi tous les systèmes de culture étudiés une note de durabilité faible en particulier pour le critère "Attentes de l'agriculteur". Ce critère traduit la qualité des conditions de travail et la facilité de mise en œuvre. On peut imaginer que l'introduction d'une légumineuse tend à complexifier les interventions culturales, la légumineuse étant plus difficile à maîtriser par rapport aux céréales par exemple. La satisfaction des attentes de la société concerne notamment la fourniture de matières premières traduit par le rendement obtenu. Les trois systèmes avec lentille apparaissant en rouge, cela s'explique certainement par le faible rendement de cette culture pour l'année étudiée.

5.1.5.3. Concernant la dimension environnementale

11 systèmes de culture sur 20 présentent une note de durabilité positive. L'ensemble des systèmes est jugé durable sur le critère "Pression sur les ressources abiotiques" c'est à dire sur l'eau et sur le phosphore. A l'inverse, la grande majorité des systèmes ont une note de durabilité faible pour le critère "Biodiversité" qui regroupe ici la macrofaune, la flore et les microorganismes. Ce critère est influencé par les pratiques de travail du sol, les apports de matières organiques et l'usage des produits phytosanitaires. On remarque ici que les systèmes avec labour semblent moins durables notamment pour le critère macrofaune. Toutefois, c'est davantage le niveau de produits phytosanitaires utilisé qui fait basculer le critère en rouge ou vert et les systèmes avec légumineuses ne semblent pas moins consommateurs de produits phytosanitaires. Cela se traduit également par une moindre qualité de l'eau, faisant basculer le critère "Qualité des mœurs" en rouge.

Pour chaque système de culture, un profil de durabilité ainsi qu'une analyse par dimension des forces et des faiblesses a été réalisée. Un exemple est présenté en **Annexe 9**.

Pour la suite du projet, il serait intéressant de travailler plus finement la dimension économique en s'attachant à mieux quantifier l'effet de la légumineuse dans la rotation en termes de charges opérationnelles et de marge à la rotation.

5.2. Action 2 : Potentiel de développement des cultures de légumineuses en région Normandie

5.2.1. Modélisation et évaluation des critères de performance des cultures

L'évaluation d'insertion de nouvelles cultures à haute teneur en protéines dans les systèmes de culture normands passe par la modélisation des rendements des cultures sous différentes conditions météorologiques pour évaluer l'impact des différentes années climatiques sur le potentiel de ces cultures pour lesquelles il n'existe pas assez de références terrain. La **Figure 31 A** montre la variabilité du rendement du pois dans 6 localités et la fèverole dans 9 localités (**Figure 31 B**) et dans 5 types de sols sur 11 années climatiques. On observe qu'il existe une forte variabilité, le climat de l'été 2011 conduit à une baisse drastique du rendement quel que soit la culture le lieu et le type de sol. Le rendement moyen en pois est de 4,42 t/ha (0% d'humidité), le rendement maximal est de 6,81 t/ha et le minimal 1,48. Ces rendements simulés ne tiennent compte que des aléas climatiques, en effet les stress biotiques ne sont pris en compte. La valeur moyenne des rendements simulés en fèverole est de 4,7 t/ha (0% d'humidité), la valeur maximale obtenue est de 6,62 et le rendement minimal est de 1,52 t/ha.

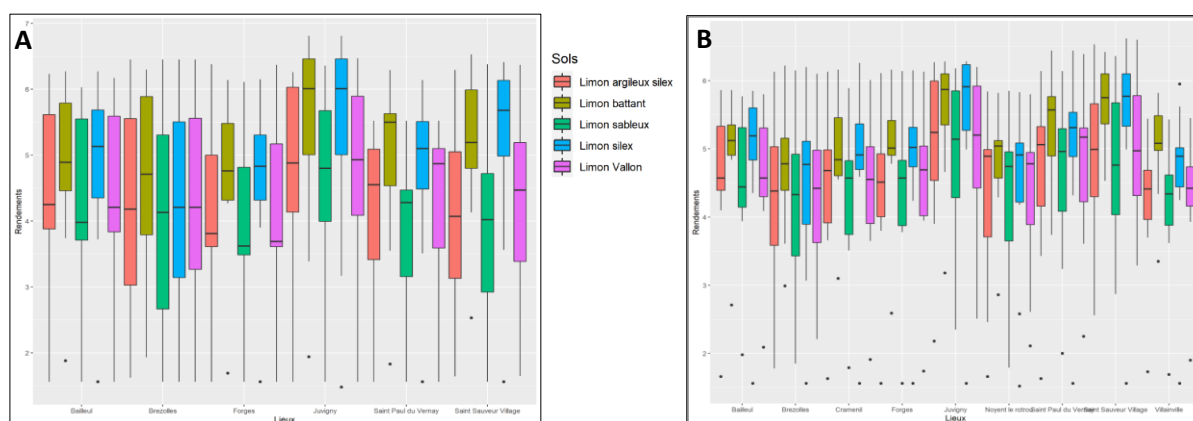


Figure 31 : Variabilité du rendement A) sur 6 lieux, 5 types de sols en pois de printemps simulés avec le modèle STICS avec les années climatiques entre 2010 et 2020. B) variabilité du rendement sur 9 lieux, 5 types de sols en fèverole de printemps simulés avec le modèle STICS avec les années climatiques entre 2010 et 2020

L'étude du potentiel d'introduction de légumineuses (pois/fèverole) basé sur les critères climatiques et les contraintes du sol en Normandie, montre que le potentiel le plus fort se situe dans le département de l'Eure (**Figure 32**). Le climat ne représente aucun frein à la culture de ces légumineuses. Les plus faibles surfaces se retrouvent dans la Manche et le Calvados.

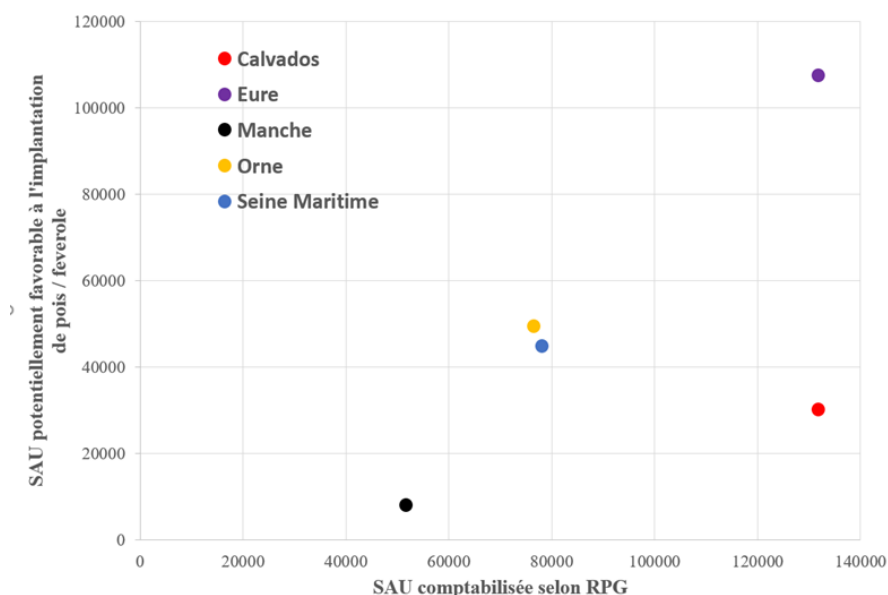


Figure 32 : Surface agricole utile par département Normand qui pourrait être utilisée pour la culture du pois et de la fèverole de printemps.

Le calcul du volume total potentiel par département en prenant en compte le rendement moyen du pois et de la fèverole et la surface totale disponible par département (**Figure 33**), les résultats confirment là encore les forts volume potentiel dans l'Eure.

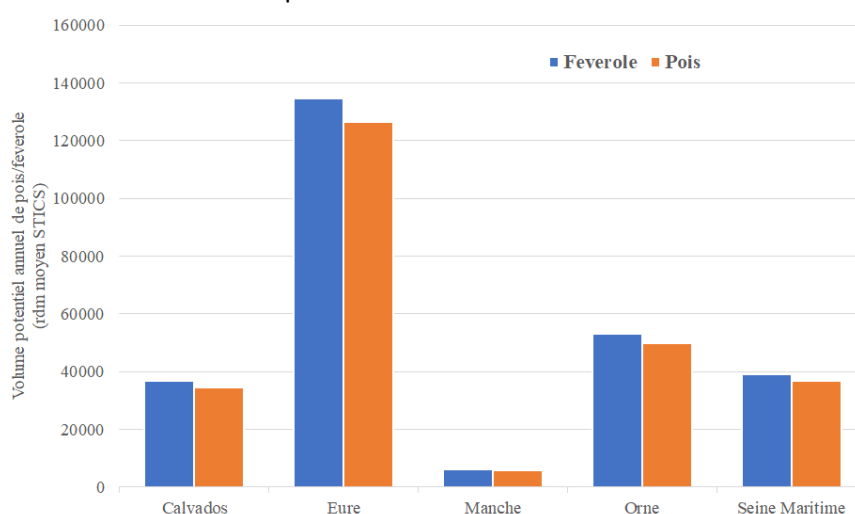


Figure 33 : Volume (Tonnes) de production par département en tenant en compte uniquement comme critère d'exclusion les sols non aptes à la culture de ces deux légumineuses.

Le travail d'identification des rotations les plus aptes à accueillir une nouvelle légumineuse, montre que substituer une des céréales quand il en existe 3 dans la rotation est l'option qui permet d'introduire plus de surface en légumineuses (**Figure 34**), suivie de la rotation présentant deux céréales. Dans une situation optimiste il est potentiellement possible l'introduction sur 54% de la surface agricole utile (SAU) comptabilisée dans le réseau parcellaire géographique (RPG), dont 48% de SAU n'ayant pas reçu de protéagineux depuis 10 ans. Dans une situation moins optimiste, l'introduction est possible sur 14% de la SAU comptabilisée RPG, dont 9% de SAU n'ayant pas reçu de protéagineux depuis 10 ans (Si les surfaces 3 pailles et sans cultures sous contrat sont exclues de la modélisation).

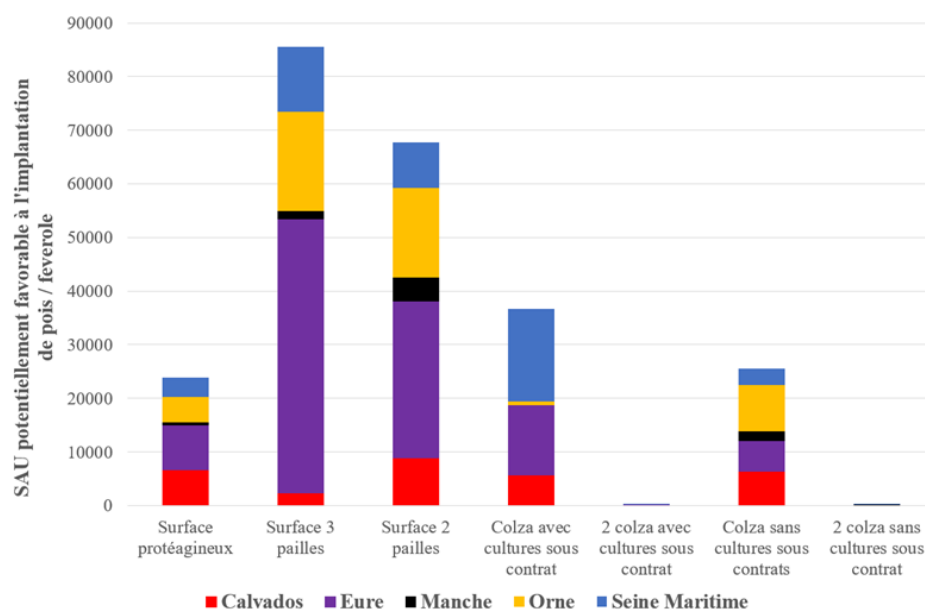


Figure 34 : Surface (ha) utilisable pour l'introduction de pois ou fèverole en fonction des règles d'insertion dans les rotation présentes dans la région, par département.

La **Figure 35** montre les parcelles où la culture de pois ou fèverole pourraient être cultivées, cette surface devrait être répartie entre l'ensemble des cultures de légumineuses qu'on souhaiterait introduire. Avec la surface par culture établie, pour calculer le volume potentiel de production annuel, la surface par culture devra être divisée par le délai de retour de chaque culture.

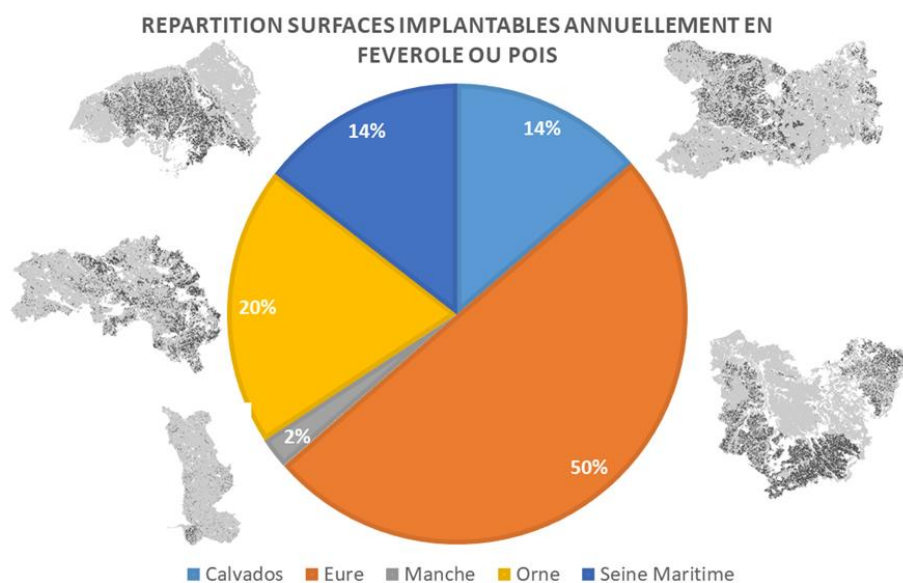


Figure 35 : Localisation des parcelles susceptibles d'accueillir une légumineuse et pourcentage par département.

5.2.2. Qualité sanitaire des cultures

5.2.2.1. Détermination du potentiel infectieux d'*Aphanomyces euteiches* dans les sols

La qualité sanitaire des cultures a été évaluée par la quantification du nombre de génome d'*Aphanomyces euteiches* dans les sols de culture de pois et de lentille à deux dates de prélèvement,

avant semis et avant récolte. Les résultats sont présentés dans la **Figure 36** pour les microparcelles et la **Figure 37** pour les parcelles agriculteurs.

Si les résultats montrent l'absence de détection de génome d'*A. euteiches* dans les sols avant les semis du pois et de la lentille dans des sols en micrparcelle et en parcelles agriculteurs, les résultats de quantifications d'*A. euteiches* après implantation et développement des cultures de pois et de lentille (au stade avant récolte), montrent une augmentation du nombre de génome d'*A. euteiches* dans les sols avec des quantités variables, correspondant à des potentiels infectieux (PI) allant de 1.5 à 2.5. Ces résultats mettent en exergue l'effet plante hôte qui favorise l'expression, la multiplication et l'entretien de l'inoculum d'*A. euteiches* dans les sols, puisque dans ¼ des parcelles agriculteurs, la culture de pois ou lentille a systématiquement augmenté le PI d'*A. euteiches* dans le sol.

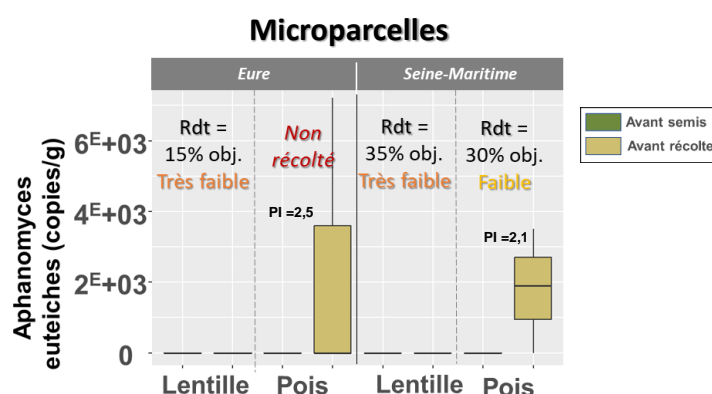


Figure 36 : Quantification du nombre de génome d'*Aphanomyces euteiches* dans les sols de pois et de lentille en microparcelles

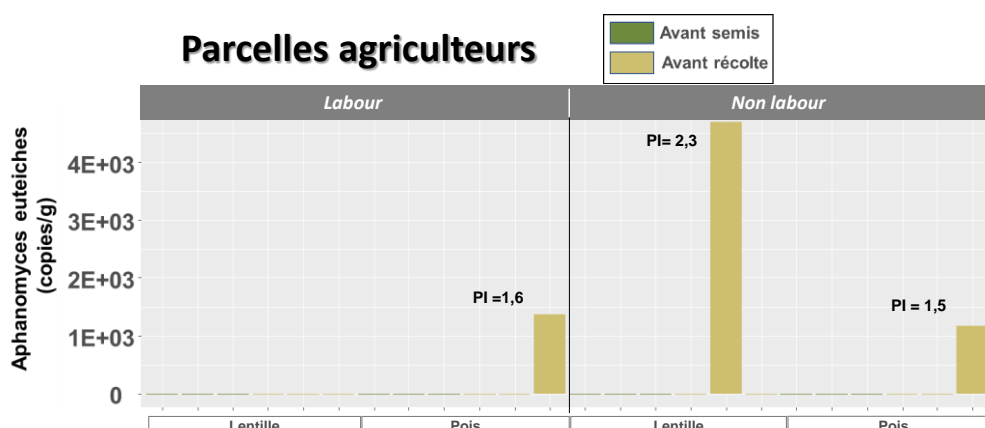


Figure 37 : Quantification du nombre de génome d'*Aphanomyces euteiches* dans les sols de pois et de lentille en parcelles agriculteurs

Des travaux précédents réalisés au sein de l'unité AGHYLE sur le cas du pathosystème Pois/*Aphanomyces euteiches* ont montré une relation directe entre la densité d'inoculum présent c'est-à-dire, le nombre de génome d'*A. euteiches* mesuré dans le sol et les symptômes observés sur la plante. Cependant des incertitudes subsistent quant à la sensibilité de ce test pour les sols contenant entre 1 et 200 génomes par gramme de sol pour lesquels les facteurs environnementaux restent probablement très déterminants dans l'apparition de la maladie. Dans le cas du projet PROVEG, malgré

la présence d'*A. euteiches* dans les sols, les faibles rendements des cultures de pois et lentilles ne semblent pas liés aux dommages causés par *A. euteiches* selon les informations communiquées par les agriculteurs et les gestionnaires de site de la coopérative Natup. Ces résultats représentent néanmoins un diagnostic préventif et prédictif de la maladie qui reste une piste intéressante pour construire une stratégie de lutte basée sur l'évitement de la maladie.

5.2.2.2. Intérêt des cultures de légumineuses en association

5.2.2.2.1. Caractérisation de la composition des exsudats de pois et de féverole par analyse RMN

Les précédents travaux ont indiqué que les exsudats racinaires de féverole exercent un effet répulsif sur les zoospores de l'oomycète *Aphanomyces euteiches* responsable de la pourriture racinaire chez le pois (Laloum, 2017; Laloum et al., 2021). Toutefois, les molécules présentes dans les exsudats racinaires impliquées dans ces mécanismes ne sont toujours pas identifiées. L'objectif de ces travaux est de développer une technique d'analyse métabolomique globale permettant de travailler sans à priori sur l'analyse des exsudats racinaires. L'analyse des métabolites par résonance magnétique nucléaire (RMN) n'a jamais été réalisée sur des exsudats et nécessite donc la mise au point des techniques de récolte et d'analyse spécifiquement à ce type d'échantillons. Nous avons donc mis en œuvre des cultures en hydroponie des plantules de pois et de féverole et tester différentes méthodes de récolte des exsudats. Les principales étapes du protocole adapté à l'analyse des exsudats racinaires sont décrites (**Figure 38**). La stérilisation des graines [30 pois (Astronaute), 15 féveroles (Fanfare)] précède les semis sur papier Whatman. Après 2 jours de culture, les plantules sont transférées en culture hydroponique dans un milieu nutritif Murashige et Skoog (milieu MS). Les racines sont rincées avant transfert dans un milieu de récolte. La durée de cette étape et la composition du milieu de récolte ont dû être optimisées. Une poudre d'exsudats est obtenue après lyophilisation du milieu de culture.

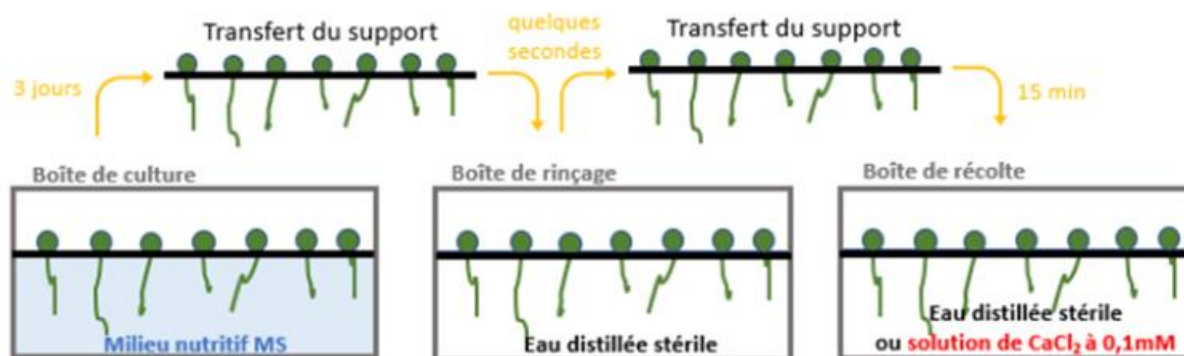


Figure 38 : Schéma illustrant la mise au point de la technique de cultures des plantes et de récolte des exsudats de pois et de féverole en vue de l'analyse des métabolites par RMN.

Les résultats obtenus pour le pois et la féverole indiquent que la mise en place du protocole de récolte des exsudats est adapté à l'analyse par RMN. Cette technique permet la détection de métabolites de petites masses moléculaires incluant les acides aminés, les acides organiques, les sucres et des métabolites secondaires tels que les phytoalexines (**Figure 39**).

Par ailleurs, les spectres obtenus indiquent qu'il est possible de discerner des profils d'exsudation spécifique à chaque espèce végétale. Des différences ont ainsi pu être mises en évidence entre la composition en exsudats de pois et de féverole (**Figure 40**). Les exsudats issus des cultures de pois sont

enrichis en acides aminés tandis que ceux provenant de la féverole sont enrichis en acides organiques et en sucres.

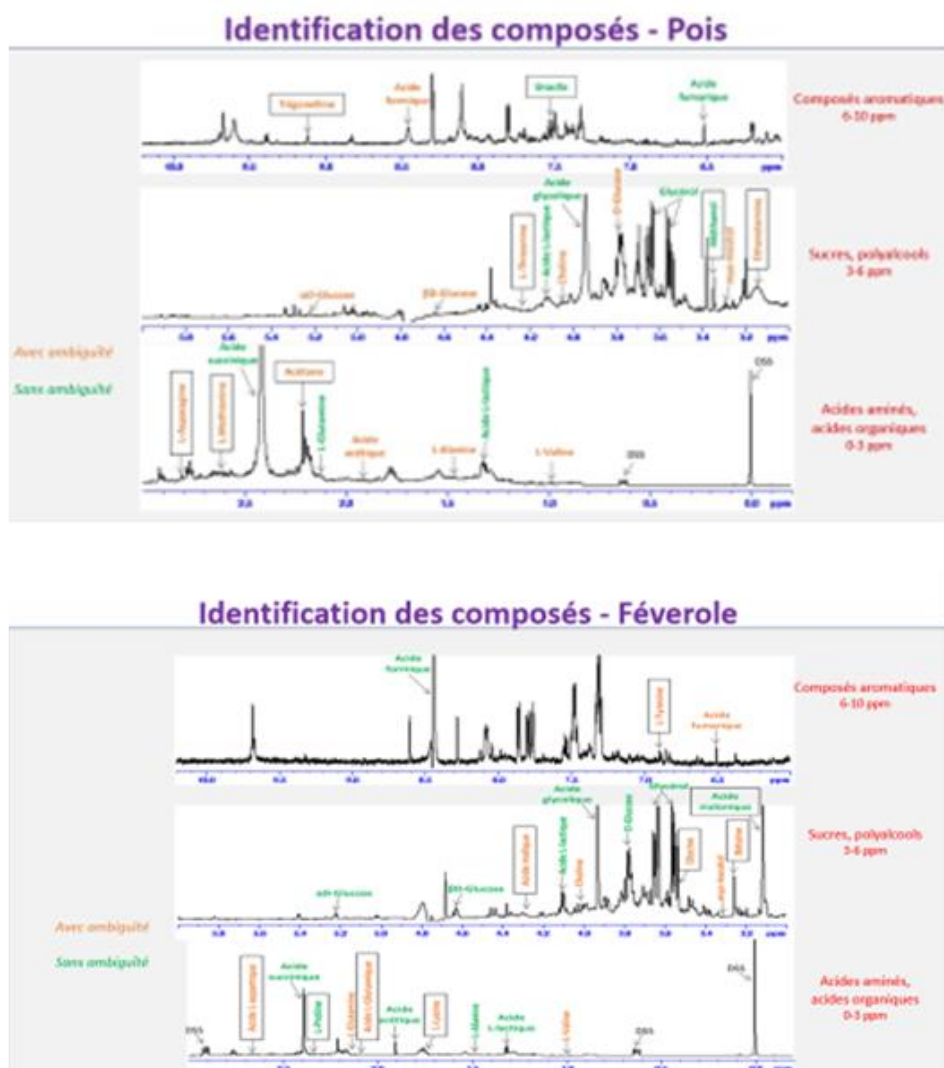


Figure 39 : Profils d'exsudation obtenus après analyse RMN pour des cultures de pois et de féverole en hydroponie.

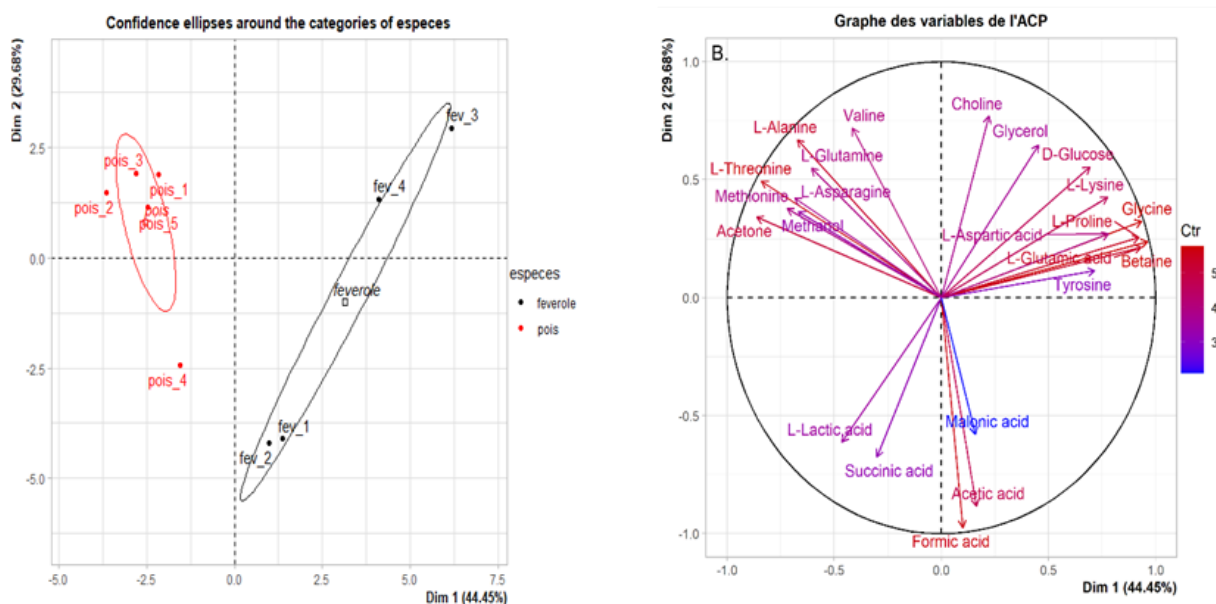


Figure 40 : Analyse statistique multivariée – Analyse en Composante Principale (ACP) des profils d'exsudation obtenus après analyse RMN pour des cultures de pois et de féverole en hydroponie.

5.2.2.2.2 Caractérisation du RET par imagerie cellulaire chez les légumineuses sélectionnées

Le piège extracellulaire (RET) est un élément clé dans la défense racinaire contre les pathogènes telluriques. Les propriétés du RET ont été précédemment démontrées chez les légumineuses telles que le pois ou le soja (Cannesan et al., 2011, 2012; Ropitiaux et al., 2020). La composition, l'organisation et le mode de détachement du RET varient suivant les espèces végétales (Carreras et al., 2020). Nous avons recherché la présence du RET pour les légumineuses sélectionnées sur des plantules cultivées en milieu gélosé après germination (**Figure 41**).

	Semis sur papier	Semis sur gélose
Pois		
Féverole		
Lentille		

Figure 41 : Semis réalisés sur papier Whatman et sur gélose pour l'observation du RET pour les différentes légumineuses, pois, féverole, lentille.

Pour cette étude, nous avons choisi des variétés de pois d'hiver (Lapony) et de printemps (Astronaute) présentant respectivement une tolérance un peu plus élevée et une plus grande sensibilité à la maladie de la pourriture racinaire occasionnée par *A. euteiches*. La féverole présente également une meilleure tolérance à l'infection racinaire tandis que la lentille est sensible au pathogène. L'objectif est d'identifier si une meilleure tolérance à *A. euteiches* peut-être corrélée à la composition moléculaire du RET.

L'étude de la composition du RET de ces espèces végétales nécessite au préalable 1) de vérifier si des différences d'infection sont effectivement observées entre les variétés Lapony et Astronaute et 2) de déterminer le stade de croissance racinaire adapté à l'analyse du RET pour chaque espèce végétale.

5.2.2.2.1. Infection racinaire précoce par *A. euteiches*

Des racines de pois et de féverole ont été infectées directement par du mycélium broyé. Deux réplicas techniques ont été réalisés. Lors du premier, les racines ont été colorées au WGA-FITC sans détérioration. C'est donc la surface extérieure qui a été observée. Lors du deuxième réplica, les racines ont été coupées longitudinalement après infection et avant coloration afin de pouvoir en observer l'intérieur (**Figure 42**). Les observations ont été séparées selon la compartimentation de la racine : coiffe racinaire, zone d'élongation, zone de maturation.

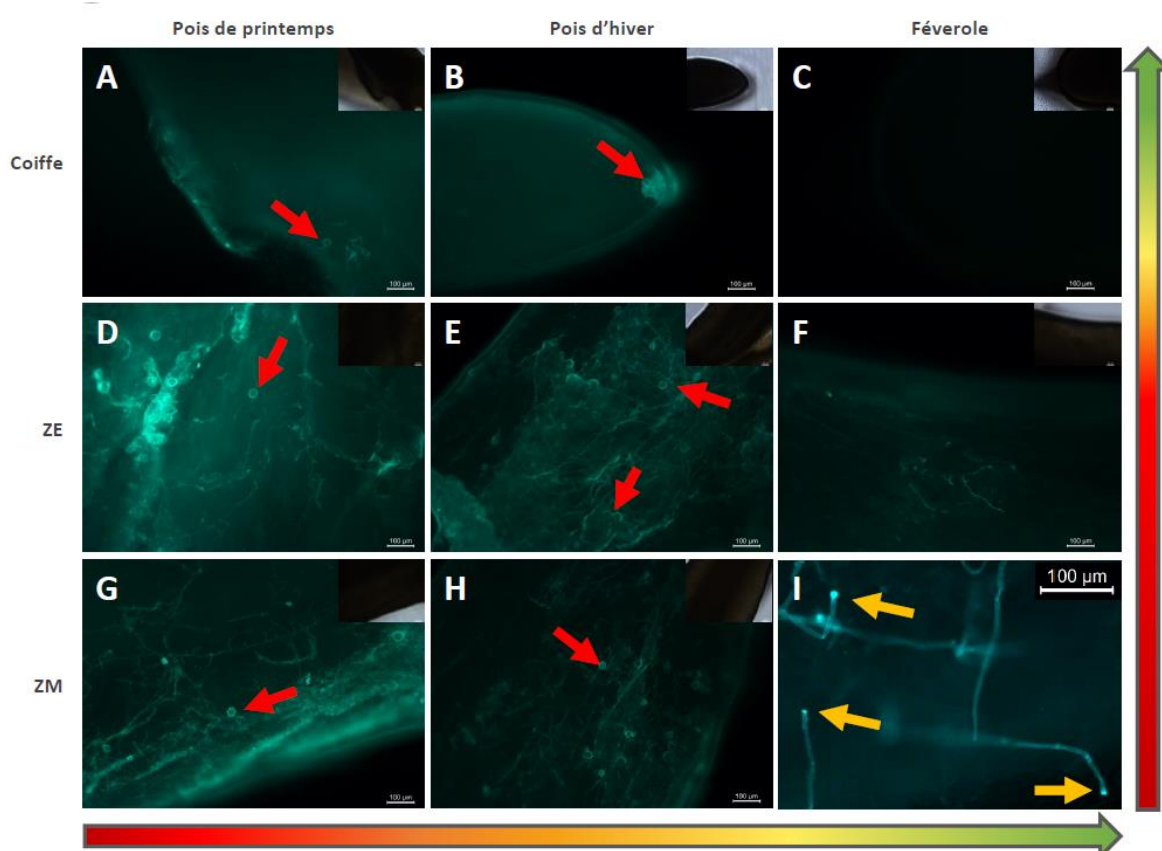


Figure 42 : Mise en évidence de l'infection par *A. euteiches* dans les différents compartiments racinaires (coiffe, zone d'élongation ZE ; zone de maturation ZM) par coloration au WGA-FITC et observation par microscopie à épifluorescence. La présence de fluorescence témoigne de la présence de mycélium ou de spores d'*A. euteiches*.

La coiffe racinaire apparaît dépourvue de mycélium, seuls quelques oospores sont détectés. La présence d'un marquage abondant dû à la présence de mycélium et d'oospores est observée au niveau de la zone d'élongation et de maturation des plantes infectées. Des zoospores enkystées, ayant donné naissance à un nouveau mycélium fraîchement développé au sein de la racine sont également présents. Les racines de pois de printemps apparaissent plus envahies de mycélium que celles de pois d'hiver. La présence de mycélium et de spores est moins importante pour les racines de féverole comparativement aux pois.

5.2.2.2.2. Élongation racinaire des différentes plantes

Des cinétiques de croissance ont été réalisées sur les différentes espèces cultivées *in vitro* afin de déterminer le stade optimal pour l'étude du RET. La moyenne des mesures de longueur racinaire est représentée pour chaque espèce en fonction de leur âge dans le **Tableau 10**. Nous pouvons observer une différence de croissance entre chaque espèce, en effet la longueur des racines au premier jour pour la lentille est plus importante que celles du pois et de la féverole. Après 5 à 6 jours de croissance, toutes les longueurs de racines sont du même ordre entre 2 et 3 centimètres de longueur.

Tableau 10 : Moyenne des mesures des longueurs de racines (en centimètres) après germination des graines, et leur écart-type

Nombre de jours après germination des graines	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
Pois Astronaute	0,13	1,68	2,24	2,45	2,67	3,04	3,38	5,67	4,29	5,05	3,82	3,12	5,69	7,50
	±	±	±	±	±	±	±	±	±	±	±	±	±	±
	0,07	0,63	1,33	1,17	1,40	1,38	1,68	3,32	2,48	3,16	3,05	1,94	3,85	5,03
Pois Lapony	0,19	1,47	2,06	1,71	2,17	2,75	3,88	4,10	4,13	4,45	5,56	4,78	4,73	3,70
	±	±	±	±	±	±	±	±	±	±	±	±	±	±
	0,09	0,69	0,86	0,75	0,87	1,17	2,42	2,09	2,61	3,56	4,23	3,39	3,67	2,39
Lentille	0,30	0,89	1,82	2,50	3,40	5,08	4,46	4,12		8,38		8,87		10,1
	±	±	±	±	±	±	±	±		±		±		2 ±
	0,16	0,53	0,99	0,97	2,11	2,41	2,19	3,19		3,40		3,94		1,97
Nombre de jours après germination des graines	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	
Féverole	1,96	2,52	3,34	4,21	2,47	3,32	1,99	3,80	3,86	4,18	9,97	6,11	5,54	
	±	±	±	±	±	±	±	±	±	±	±	±	±	
	1,25	1,49	2,23	2,85	1,64	2,70	1,56	2,76	3,55	2,21	3,18	5,07	3,95	

5.2.2.2.3. Observation du RET

La deuxième étape a été de mettre en évidence la présence du RET en réalisant des colorations histologiques différentes sur les apex racinaires à l'aide de l'encre de Chine et du calcofluor. Pour chaque jour, trois apex sont prélevés et une des deux colorations est réalisée. Cela nous permet de comparer le RET entre les plantules d'une même espèce d'un âge différent mais aussi une comparaison entre chaque espèce.

Nous pouvons observer que le RET ne s'est formé qu'après le 2^e jour de croissance (correspondant à environ 1 centimètre de longueur), en effet lorsque les plantules de chaque espèce ne montrent aucun mucilage observé grâce à l'encre de Chine ni aucune BC montré par le calcofluor. Les jours de croissance suivants, une augmentation de la quantité de mucilage autour de la racine et donc, par relation, une augmentation visuelle de la quantité de BCs, bien que celle-ci ne soit pas encore quantifiée avec précision, est observée. Les **Figures 43 et 44** présentent le pourcentage de surface qu'occupe le RET par rapport à la surface totale (RET + racine en contact du RET).

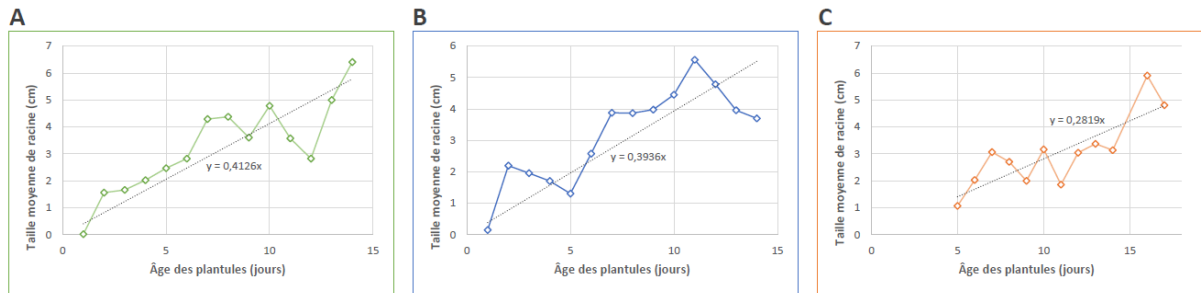


Figure 43 : Croissance racinaire (A) Pois de printemps (variété Astronaute) ; (B) Pois d'hiver (variété Lapony) ; (C) Féverole (variété Fanfare). Pour la féverole, les mesures de longueur racinaire ne peuvent être effectuées qu'après le cinquième jour.

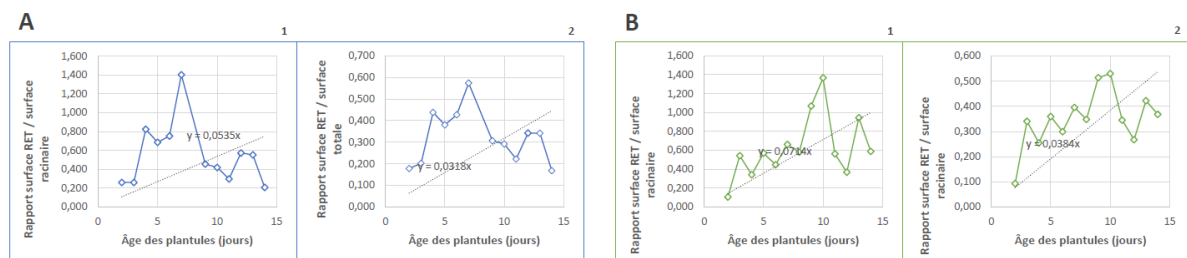


Figure 44 : Cinétique représentant l'évolution du volume de RET jusqu'à 17 jours de croissance. (A) Pois de printemps (variété Astronaute) ; (B) Pois d'hiver (variété Lapony) ; (1) volume rapporté à la surface racinaire ; (2) Surface du RET sur surface totale.

Ces résultats ont permis de sélectionner une croissance racinaire à un stade de 6 jours après semis, car il correspond à l'âge auquel les longueurs racinaires sont les plus similaires chez les trois espèces. Une quantité de RET est satisfaisante à ce stade, tout en permettant un prélèvement optimal de la racine sans dégradation du RET.

Une autre observation pouvant être faite est la différence du halo de mucilage du RET entre chaque espèce à un même jour de croissance. En effet, la féverole possède un mucilage plus important que les autres espèces suivies ensuite par le fenugrec et enfin le pois et la lentille. Les RETs des deux variétés de pois et de la féverole ont alors été observés au stade 6 jours (retenu pour toute la suite des observations ; **Figure 45**).

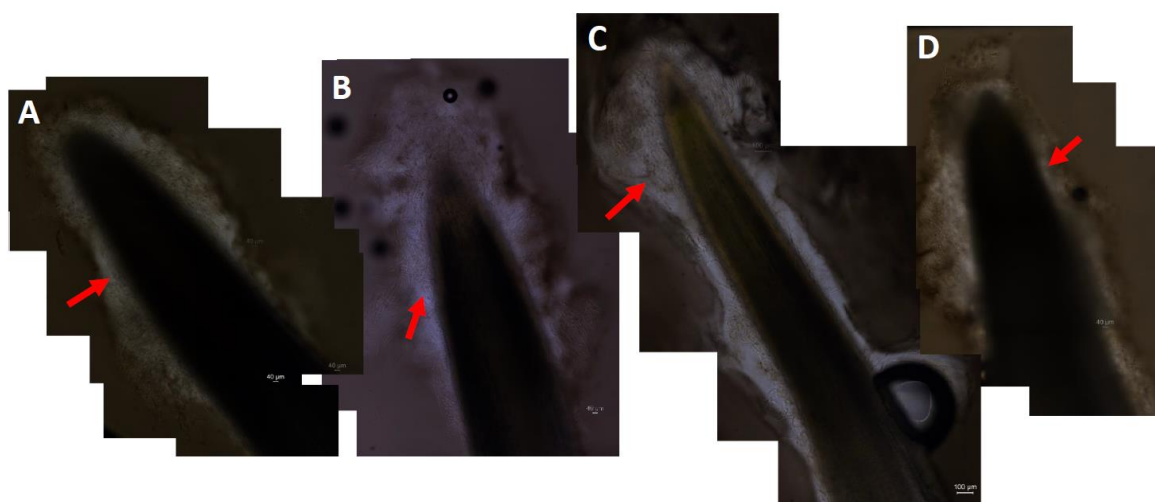


Figure 45 : Observation d'apex racinaires de plantules saines après coloration à l'encre de Chine. (A) Pois de printemps (variété Astronaute) ; (B) Pois d'hiver (variété Lapony) ; (C) Féverole (variété Fanfare) ; (D) Fenugrec. Les apex sont colorés à l'encre de chine pour mettre en évidence le mucilage et le RET par coloration négative sous forme de halo blanc autour de la racine (indiqué par une flèche).

Différents morphotypes de cellules bordantes (BCs) sont présents pour chaque espèce. Pour le pois, nous retrouvons des BCs sphériques et intermédiaires au bout de l'apex puis des allongés aux abords de la coiffe et de la zone d'élongation pour les deux variétés étudiées. Des résultats similaires sont observés pour le fenugrec. Pour la féverole, nous trouvons en très grande majorité des cellules allongées ainsi que quelques intermédiaires mais les sphériques sont très rares. Concernant la lentille, nous observons, au bout de l'apex, des cellules intermédiaires en majorité avec quelques cellules sphériques. En revanche, la forme globale du mucilage mis en évidence par coloration négative à l'encre de Chine apparaît relativement similaire chez les trois espèces (**Figure 46**)

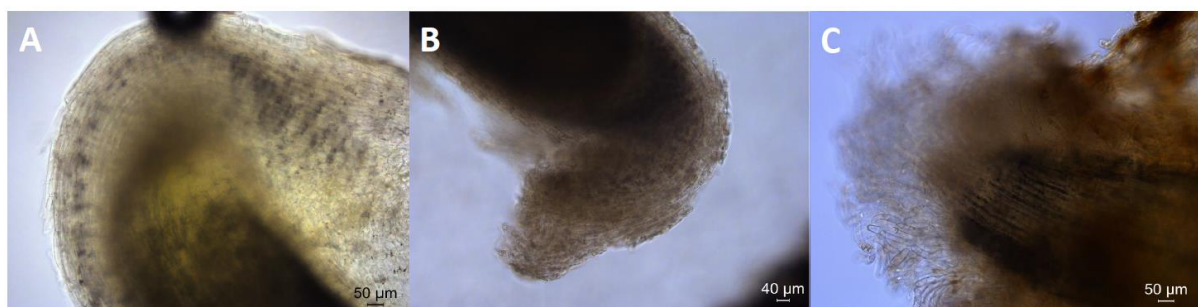


Figure 46 : Observations à plus forts grossissements sur le RET après coloration à l'encre de Chine. (A) Pois de printemps (variété Astronaute) ; (B) Pois d'hiver (variété Lapony) ; (C) Féverole (variété Fanfare)

5.2.2.2.4. Caractérisation du RET par imagerie cellulaire

La composition en glycomolécules pariétales (pectines, hémicelluloses, extensines, arabinogalactane-protéines « AGPs ») du RET a été réalisée pour les variétés de pois Lapony, Astronaute et la féverole. Les anticorps utilisés ainsi que les épitopes reconnus sont synthétisés dans le **Tableau 11**.

Tableau 11 : Résumé des résultats obtenus pour la détection des épitopes associés aux glycomolécules pariétales dans le RET des variétés de pois Lapony, Astronaute et de la féverole.

Classe de biopolymères	Anticorps primaire (épitope)	Concentration d'anticorps primaire	Pois Astronaute		Pois Lapony		Féverole Fanfare	
			Apex	BC	Apex	BC	Apex	BC
Hémi-celluloses	LM25 (xyloglucanes)	1/5	+++	+++	+++	+++	+++	+++
	LM21 (mannanes)	1/5	+	++	+	+	0	0
	LM8 (xylo-galacturonanes)	1/5	0	0	0	+	0	+
AGPs	LM2 (liaisons d'acide β -glucuronique)	1/5	+	+	++	++	0	+
	JIM8	1/2 ; 1/5 ; 1/10	+	0	+	0	0	0
	JIM13 (chaînes de GlcA- β -(1 \rightarrow 3)-GalA- α -(1 \rightarrow 2)-Rha)	1/2 ; 1/5 ; 1/10	0	+	+	+	0	0
	JIM14	1/5	0	0	+	+	0	0
Pectines	LM6 (arabinanes)	1/5	0	0	0	0	0	0
	LM19 (homo-galacturonanes faiblement méthylés/estérifiés)	1/5	+	+++	+	++	++	+++
	LM20 (homo-galacturonanes fortement méthylés/estérifiés)	1/5	++	+++	+	++	++	+++
Extensines	LM1	1/2 ; 1/5 ; 1/10	+	+	+	0	0	0
	JIM12	1/2 ; 1/5 ; 1/10	0	0	+	0		0
	JIM11	1/5	0	+	0	+	0	0

Le **tableau 11** est un récapitulatif des immunomarquages utilisés sur plantules saines, et de la fluorescence obtenue sur BCs seules après « touch » (détachement manuel du RET de l'apex par dépôt), ainsi que sur les apex. La présence d'épitopes est détectée chez au moins une des trois espèces étudiées dans trois familles de glycomolécules pariétales : hémicelluloses, AGPs et pectines. Les épitopes associés aux extensines ne sont pas ou très peu détectés, malgré l'utilisation de trois anticorps différents (correspondant à autant d'épitopes).

Une attention particulière est portée sur les épitopes associés aux AGPs. Quatre anticorps spécifiques anti-AGP ont été utilisés. Parmi eux, l'utilisation de JIM8, JIM13 et JIM14 n'a pas été concluante, car peu de fluorescence est détectée. Toutefois, des différences en terme d'intensité de fluorescence sont détectées avec l'anticorps LM2 chez les deux variétés de pois. Une plus forte intensité de signal est détectée au niveau des BCs par rapport à l'apex pour la variété Lapony (**Figure 47**).

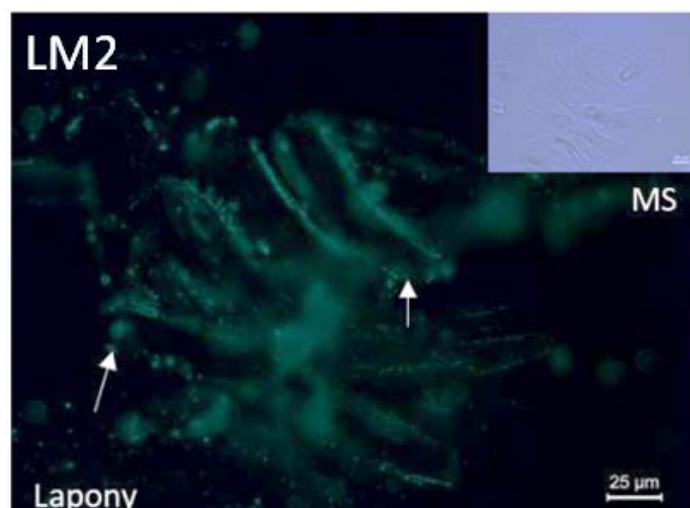


Figure 47 : Immunodétection des épitopes associés aux AGPs reconnus par l'anticorps LM2 à la surface des cellules bordantes de pois de la variété Lapony et observation en microscopie confocale à balayage laser.

Considérant le rôle essentiel des AGPs dans les interactions entre légumineuses et *A. euteiches*, une étude approfondie de ces AGPs s'avère nécessaire. Par ailleurs, une analyse de la composition en AGPs après infection par *A. euteiches* sera envisagée en perspectives de ses travaux. En effet, l'utilisation du β -glucosyl-Yariv, (réactif se liant aux AGPs et permettant de les précipiter et de les colorer) révèle un marquage de particulièrement forte intensité dans le cytoplasme des cellules bordantes de pois (Figure 48)

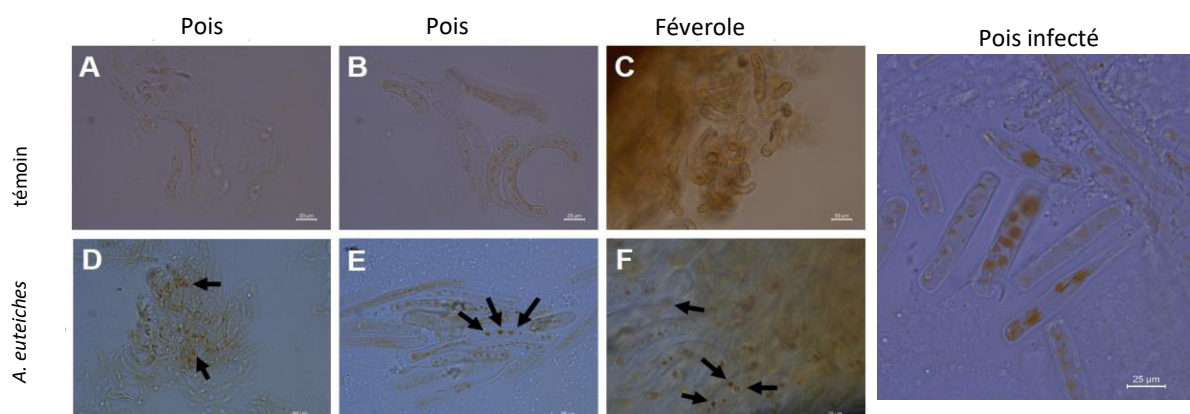


Figure 48 : Mise en évidence des AGPs dans les cellules bordantes de racine de pois et de féverole après infection avec *A. euteiches* et observation en microscopie en lumière transmise. La présence de vésicules dans le cytoplasme des cellules est indiquée par les flèches noires.

5.2.2.2.3. Analyse des AGPs par approche biochimique

Une analyse semi-quantitative des AGPs présentes au sein des exsudats racinaires par diffusion radiale a été réalisée (Figure 49). Au total, deux productions et deux récoltes d'exsudats ont été réalisées, soit deux répliques biologiques (sauf pour la féverole). Lors de ces deux essais de récolte, les exsudats ont été répartis dans deux tubes (soient deux répliques techniques de récolte par réplique biologique de récolte). Les essais de diffusion radiale sur gel d'agarose contenant du β -glucosyl-Yariv ont été effectués deux fois, c'est-à-dire sur deux boîtes de Pétri, soit deux nouveaux répliques techniques. La quantité d'AGPs est exprimée par référence à une courbe standard établie avec une gamme étalon de Gomme Arabique commerciale. La gomme arabique a une structure proche des AGPs et est donc considérée comme des AGPs pures. Il s'agit ici d'une approche semi-quantitative. La courbe de référence semble suivre une fonction logarithmique d'équation suivante :

$$y = 67,177 * \ln(x) + 454,62 \quad (1)$$

avec :

- y = le diamètre de diffusion (mm)
- x = la concentration en AGPs par échantillon (mg/mL ou $\mu\text{g}/\mu\text{L}$)

La concentration en AGPs par échantillon est ainsi déduite par isolation de la variable x :

$$x = \exp^{(y - 454,52) / 67,177} \quad (2)$$

On peut ainsi déduire le rapport en unité d'AGPs par exsudats :

$$A = x / 100 \quad (3)$$

Avec :

- A = le rapport AGP/exsudat (g/g)
- x = la concentration en AGPs par échantillon (mg/mL ou $\mu\text{g}/\mu\text{L}$)
- 100 = la concentration en exsudats par échantillon

La **Figure 48** montre le rapport moyen d'AGPs par exsudats en g/g selon l'espèce. Une tendance générale se dessine: la féverole semble présenter un rapport moins élevé que les deux espèces de pois, à raison d'environ 0,0002 ($\pm 0,00018$) g/g et donc moins d'AGPs dans ses exsudats. Les rapports des deux pois sont quant à eux comparables, bien que très légèrement supérieur pour le pois d'hiver. Cependant, cette expérience souffre encore d'un manque de répétabilité, car si le test non-paramétrique de comparaison des moyennes de Kruskal-Wallis a retourné une p-value inférieure à 5% pour la variable « espèce », c'est également le cas pour la variable « réplica technique de récolte » et « boîte de diffusion ». Cela veut donc dire qu'il peut y avoir une influence des réplicas. Il serait donc intéressant de répéter l'opération plusieurs fois, premièrement afin de pouvoir effectuer un test de comparaison des moyennes plus puissant (ANOVA), et de pouvoir confirmer ou infirmer la variation des résultats selon les réplicas et donc ajuster ou non le protocole.

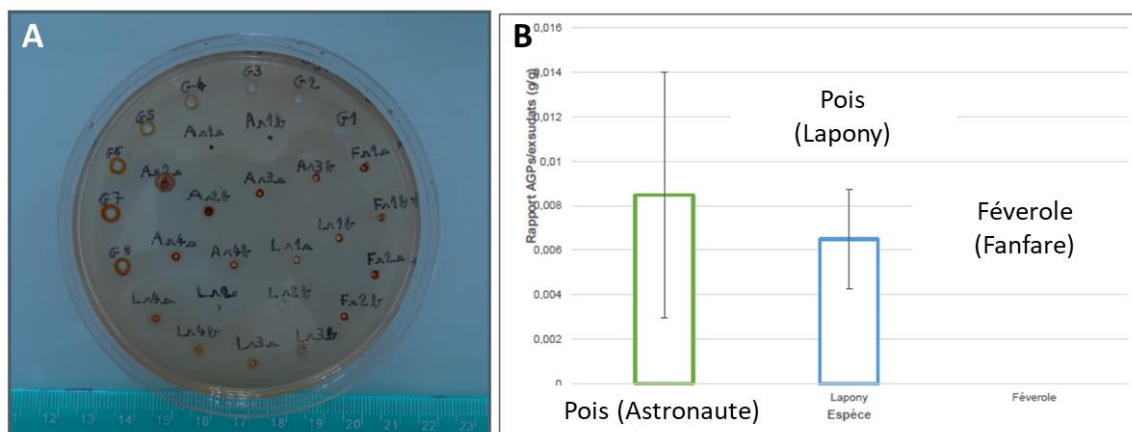


Figure 49 : Analyse semi-quantitative des AGPs présentes dans les exsudats des plantules de pois (Astronaute et Lapony) et féverole (Fanfare). (A) gel de diffusion radiale. (B), quantité d'AGPs détectée dans les exsudats racinaires des 3 plantules exprimées en g/g d'exsudats.

5.3. Action 3 : Communication, transfert des connaissances et livrables

Dans le cadre du projet PROVEG plusieurs actions de communication ont été réalisées sous forme de présentations orales ou par affiche sous forme de posters, présentés dans différents congrès et

colloques nationaux et internationaux. Toutes les actions de communication sont répertoriées dans le **Tableau 12**.

Tableau 12 : Bilan des actions de communications menées dans le cadre du projet PROVEG

Evènements/congrès	Format	Date	Partenaire en charge
Congrès Landscape 2021 - Diversity for Sustainable and Resilient Agriculture (online)	Poster	20-22 septembre 2021	UniLaSalle
Groupe de travail national LEG & Plante de services du RMT Bouclage (au CTIFL- Paris)	Oral	03 décembre 2021	UniLaSalle
Journée sur le plan des protéines végétales à destination de l'alimentation humaine (Région Normandie (online)	Oral	06 décembre 2021	UniLaSalle
RFMF 2021- Aussois : poster	Poster		Université de Rouen, GlycoMEV
Journées interdisciplinaires PHARE – Sophia-Antipolis,	Oral	16 et 17 novembre 2021	Université de Rouen, GlycoMEV
Prix de mémoire de fin d'études de la fondation Xavier Bernard-Paris	Oral	22 septembre 2021	Université de Rouen, GlycoMEV
WORKSHOP « L'AGROÉCOLOGIE AU SERVICE D'UNE BIOÉCONOMIE DURABLE, MYTHE OU RÉALITÉ ? - Beauvais	oral	19 novembre 2021	UniLaSalle
Journées annuelles de la SFR NORVEG –Saint Malo	Oral	10 juin 2022	UniLaSalle
Journées annuelles de la SFR NORVEG –Saint Malo	Oral	10 juin 2022	Université de Rouen, GlycoMEV
Journées annuelles de la SFR NORVEG –Saint Malo	Poster	10 juin 2022 (Prix Poster)	Université de Rouen, GlycoMEV

Aussi l'ensemble des résultats acquis ont été présentés lors d'une journée de restitution qui s'est déroulée **le 24 juin 2022 à UniLaSalle** en présence des membres du comité de pilotage du projet, des représentants de la région et du pôle Bioeconomy for change ainsi que l'ensemble des partenaires du projet dont le save the date est présenté dans la **Figure 50**.



Figure 50 : Présentation du save the date qui a servi à l'annonce de la journée de restitution des résultats du projet PROVEG.

Dans le cadre du projet PROVEG, plusieurs livrables ont été produits et notamment des fiches à destination des agriculteurs et des conseillers agricoles. Il s'agit de documents de restitution de résultats aux agriculteurs. Ces fiches synthétiques et bien illustrées présentent les données des

analyses de sols réalisées dans chaque parcelle et pour chaque agriculteur (**Figure 51, annexe 10**). D'autres fiches ont été construites pour la restitution des résultats de l'évaluation multicritères présentées précédemment (**annexe 9**)

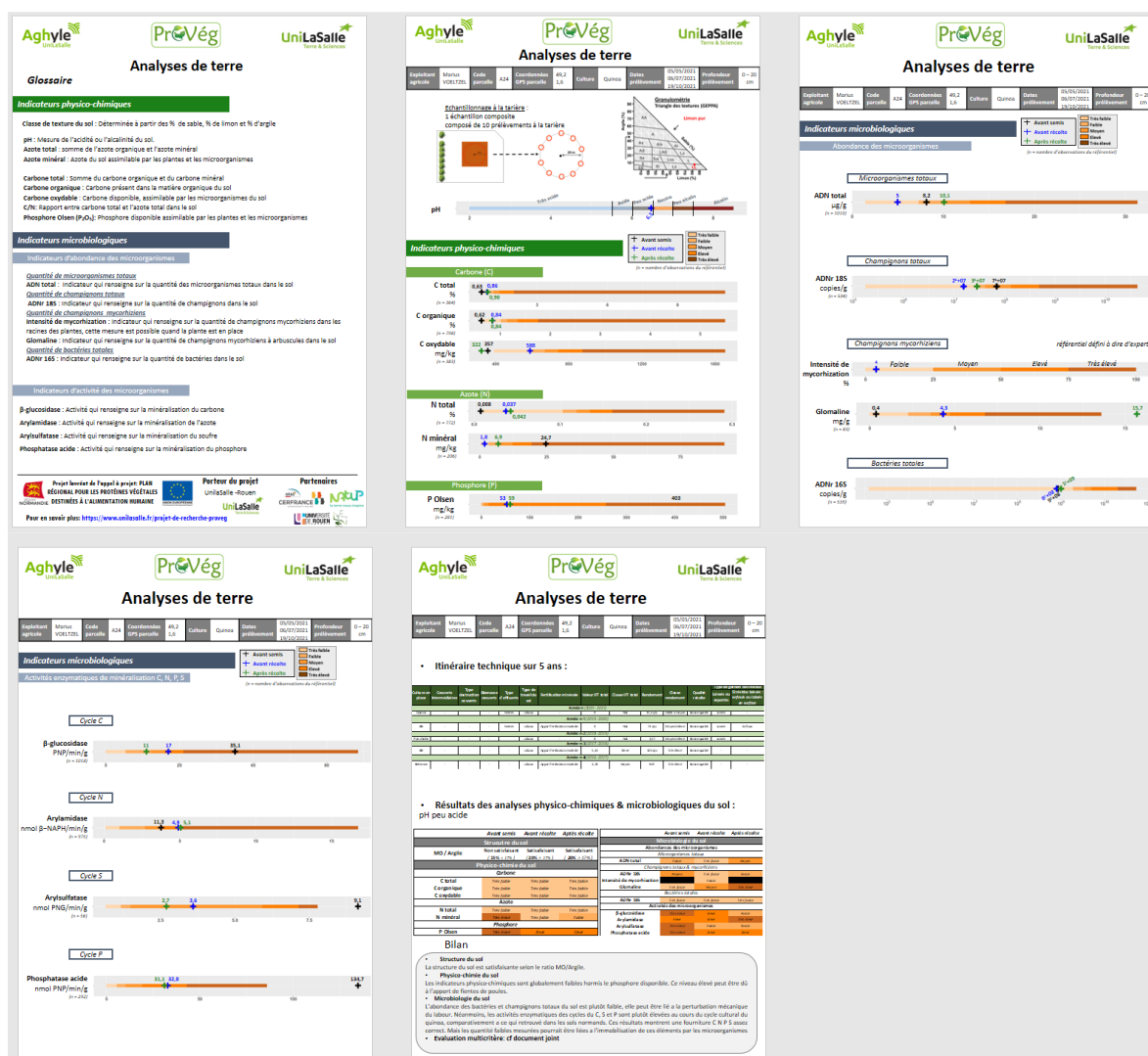


Figure 51 : : Exemple de fiches agriculteurs qui a servi à la restitution des résultats du projet PROVEG aux agriculteurs.

6. Conclusions et perspectives

Le projet PROVEG visait à évaluer et spatialiser le potentiel d'introduction de 5 cultures riches en protéines (pois, féverole, lentille, lupin et quinoa), mineures, ou peu implantées en région Normandie. Les enjeux du projet étaient de i) déterminer un état souhaitable du sol permettant d'implanter ces cultures de façon durable en Normandie, ii) réaliser une évaluation multicritère pour étudier la durabilité de ces cultures d'un point de vue économique, social et environnemental, iii) d'évaluer le potentiel de déploiement de ces cultures dans les sols Normands et iv) d'évaluer l'état sanitaire de ces cultures.

i) Concernant l'identification de l'état souhaitable du sol pour l'implantation des légumineuses, les contextes pédoclimatiques des microparcelles et des parcelles agriculteurs étaient relativement proches avec peu de variabilité, ce qui n'a pas permis d'identifier un état du sol précis, plus favorable à l'implantation de ces cultures, sur la base du panel des indicateurs biophysicochimiques mesurés.

Ces travaux ont néanmoins permis d'évaluer l'effet de l'introduction de ces cultures sur l'état du sol. En effet, l'introduction de ces cultures modifie l'état physicochimique et biologique du sol.

- ☐ **Etat physique du sol** : maintien de la structure du sol
- ☐ **Etat chimique du sol** : maintien du pH, P₂O₅, C organique, N total et **augmentation du C labile**
- ☐ **Etat biologique** : Maintien des **activités enzymatiques** en lien avec la fourniture des éléments nutritifs CNP
- ☐ Effet du labour sur les communautés bactériennes et fongiques
- ☐ Effet rhizosphérique positif lors de l'implantation de ces cultures :
 - ✓ Augmentation de l'activité **métabolique fonctionnelle potentielle des bactéries du sol sous les cultures de légumineuses**
 - ✓ Présence d'activités **symbiotiques (Intensité de mycorhization et Abondance arbusculaire)** importantes et notamment en non-labour

Par ailleurs les résultats ont mis en avant la forte variabilité temporelle des paramètres physicochimiques et biologiques mesurés au cours du cycle cultural des cultures étudiées, mettant en exergue le rôle de l'humidité du sol dans la variabilité des paramètres mesurés.

L'évaluation des facteurs explicatifs de la variabilités des rendements montre que les pratiques liées à la mise en place des cultures n'influencent pas les rendements de ces cultures. En effet, les rendements semblent plutôt dépendants de l'état du sol et notamment :

- ☐ **Le Statut organique du sol** (C & N total, C organique, C labile)
- ☐ **L'état biologique du sol** (les activités enzymatiques et l'état symbiotique des plantes et le ratio champignons/bactéries)
- ☐ Humidité du sol

ii) l'évaluation multicritère des systèmes de culture incluant les légumineuses et le quinoa montre que le type de culture n'influence pas le profil de durabilité. Le profil de durabilité des systèmes de culture semble plutôt dépendant du type de rotation, du mode de travail du sol et du niveau du risque d'érosion du sol

iii) le travail de modélisation pour l'identification du potentiel d'implantation des légumineuses en région Normandie montre que **l'introduction du pois et de la féverole** est potentiellement possible **sur 54% de la SAU comptabilisée RPG, dont 48% de SAU n'ayant pas reçu de protéagineux depuis 10 ans**, dans les cas les plus optimistes. Ces surfaces baissent dans une situation moins optimiste. En effet, l'introduction serait alors possible **sur 14% de la SAU comptabilisée RPG, dont 9% de SAU n'ayant pas reçu de protéagineux depuis 10 ans**. Aussi, le potentiel d'introduction des légumineuses **le plus favorable** se situe dans **l'Eure**, le plus **faible** est **dans la Manche** et le **Calvados**.

v) l'évaluation de la qualité sanitaire des cultures par la quantification du potentiel infectieux (PI) d'*A. euteiches*, montrent que dans ¼ des parcelles agriculteurs, la culture de pois ou lentille a augmenté le PI *A. euteiches*, d'où la nécessité de recourir au diagnostic préventif avant l'implantation de ces cultures.

Aussi, dans l'objectif de diminuer l'impact de la pourriture racinaire liée à la présence d'*A. euteiches*, des associations de cultures pois /féverole est une piste prometteuse. En effet, une analyse métabolomique par résonnance magnétique nucléaire (RMN) des exsudats racinaires des deux légumineuses révèle que les exsudats de féverole sont riches en acides organiques et en sucres alors

que ceux du pois sont enrichis en acides aminés, confirmant des observations antérieures sur l'effet biocontrôle potentiel des exsudats de féverole contre *A. euteiches*.

En perspective de poursuite de ces travaux, une seconde phase du projet a été proposée à l'appel à **manifestation d'intérêt protéines et filières d'avenir en Normandie 2022**. L'objectif de PROVEG 2 est de poursuivre l'étude de l'effet de l'implantation des cultures de légumineuses afin de diversifier les sources de protéines végétales dans les rotations et d'identifier les freins et les facteurs d'adoption de deux cultures (pois et féverole) dans un contexte interrégional (région Haut de France, Grand Est et Normandie), afin de favoriser leur déploiement. Il s'agit de cerner les pratiques existantes, mais encore marginales, ainsi que d'autres potentiellement améliorantes, susceptibles d'être mises en œuvre pour permettre leur développement sur le terrain, et qui soient en adéquation avec le potentiel fonctionnel attendu du sol. Il sera également important de contrôler le maintien de la qualité nutritionnelle de ces cultures (Figure 52).

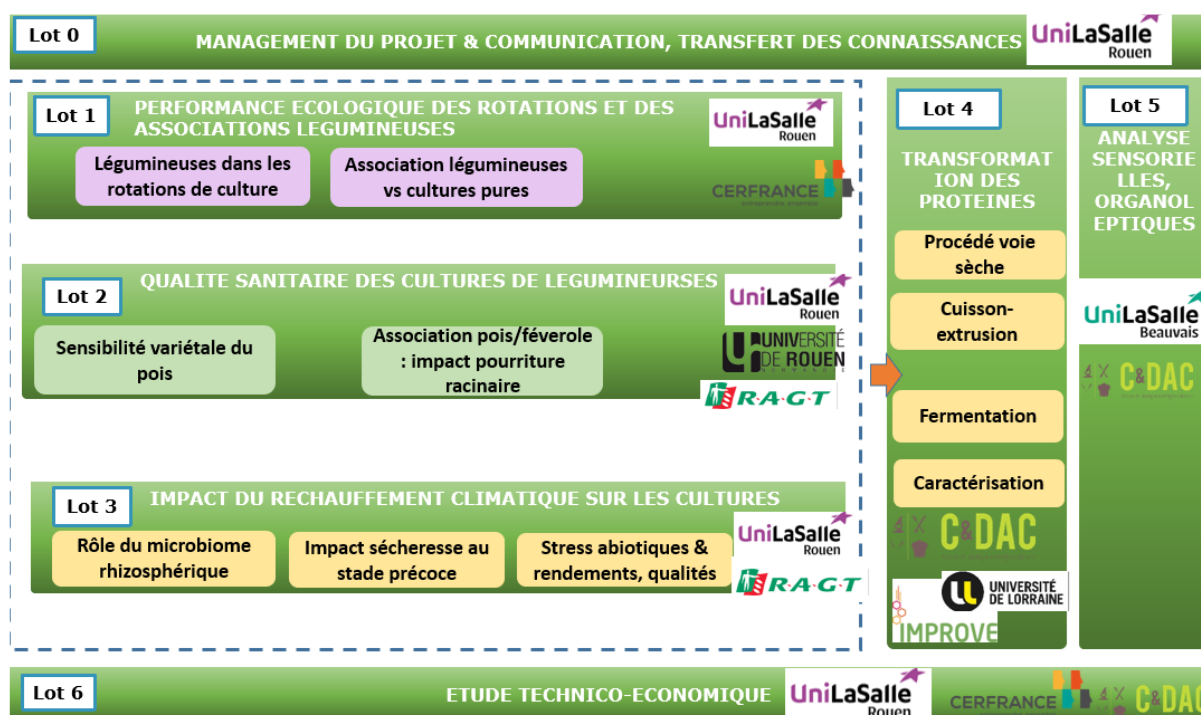


Figure 52 : Organisation de la phase 2 du projet PROVEG, présentation des différentes actions ainsi que les partenaires impliqués dans le projet

Bibliographie

Aschi A, Aubert M, Riah-Anglet W, Nélieu S, Dubois C, Akpa-Vinceslas M, Trinsoutrot-Gattin I (2017) Introduction of Faba bean in crop rotation: Impacts on soil chemical and biological characteristics. *Applied Soil Ecology* 120: 219–228.

Bazghaleh N, Prashar P, Purves RW, Vandenberg A (2018) Polyphenolic composition of lentil roots in response to infection by *Aphanomyces euteiches*. *Frontiers in plant science* 9: 1131.

Bissett A, Richardson AE, Baker G, Thrall PH (2011) Long-term land use effects on soil microbial community structure and function. *Applied Soil Ecology* 51: 66–78.

Bittman S, Forge TA, Kowalenko CG (2005) Responses of the bacterial and fungal biomass in a grassland soil to multi-year applications of dairy manure slurry and fertilizer. *Soil Biology and Biochemistry* 37(4): 613–623.

Bulgarelli D, Schlaeppi K, Spaepen S, Van Themaat EVL, Schulze-Lefert P (2013) Structure and functions of the bacterial microbiota of plants. *Annual review of plant biology* 64: 807–838.

Calbrix R, Laval K, Barray S (2005) Analysis of the potential functional diversity of the bacterial community in soil: a reproducible procedure using sole-carbon-source utilization profiles. *European Journal of Soil Biology* 41(1): 11–20.

Cannesan MA, Durand C, Burel C, Gangneux C, Lerouge P, Ishii T, Laval K, Follet-Gueye M-L, Driouich A, Vicré-Gibouin M (2012) Effect of arabinogalactan proteins from the root caps of pea and *Brassica napus* on *Aphanomyces euteiches* zoospore chemotaxis and germination. *Plant physiology* 159(4): 1658–1670.

Cannesan MA, Gangneux C, Lanoue A, Giron D, Laval K, Hawes M, Driouich A, Vicré-Gibouin M (2011) Association between border cell responses and localized root infection by pathogenic *Aphanomyces euteiches*. *Annals of botany* 108(3): 459–469.

Cao Z, Li L, Kapoor K, Banniza S (2019) Using a transcriptome sequencing approach to explore candidate resistance genes against stemphylium blight in the wild lentil species *Lens ervoides*. *BMC plant biology* 19(1): 1–16.

Carreras A, Bernard S, Durambur G, Gügi B, Loutelier C, Pawlak B, Boulogne I, Vicré M, Driouich A, Goffner D (2020) In vitro characterization of root extracellular trap and exudates of three Sahelian woody plant species. *Planta* 251(1): 1–18.

Castellanos T, Dohrmann AB, Imfeld G, Baumgarte S, Tebbe CC (2009) Search of environmental descriptors to explain the variability of the bacterial diversity from maize rhizospheres across a regional scale. *European Journal of Soil Biology* 45(5): 383–393.

Cheviron N, Grondin V, Marraud C, Poiroux F, Bertrand I, Abadie J, Pandard P, Riah-Anglet W, Dubois C, Malý S (2022) Inter-laboratory validation of an ISO test method for measuring enzyme activities in soil samples using colorimetric substrates. *Environmental Science and Pollution Research* 29(20): 29348–29357.

Choukr-Allah R, Rao NK, Hirich A, Shahid M, Alshankiti A, Toderich K, Gill S, Butt KUR (2016) Quinoa for Marginal Environments: Toward Future Food and Nutritional Security in MENA and Central Asia Regions. *Front Plant Sci* 7: 346.

- Coba de la Pena T, Pueyo JJ (2012) Legumes in the reclamation of marginal soils, from cultivar and inoculant selection to transgenic approaches. *Agronomy for Sustainable Development* 32(1): 65–91.
- Dakhili S, Abdolalizadeh L, Hosseini SM, Shojaee-Aliabadi S, Mirmoghtadaie L (2019) Quinoa protein: Composition, structure and functional properties. *Food chemistry* 299: 125161.
- Drevon J-J, Alkama N, Bargaz A, Rodiño AP, Sungthongwises K, Zaman-Allah M (2015) The Legume–Rhizobia Symbiosis. In: *Grain Legumes* (De Ron AM, Ed.). Springer, New York, NY, p. 267–290.
- Driouich A, Follet-Gueye M-L, Vické-Gibouin M, Hawes M (2013) Root border cells and secretions as critical elements in plant host defense. *Current Opinion in Plant Biology* 16(4): 489–495.
- Falconnier GN, Journet E-P, Bedoussac L, Vermue A, Chlébowski F, Beaudoin N, Justes E (2019) Calibration and evaluation of the STICS soil-crop model for faba bean to explain variability in yield and N₂ fixation. *European Journal of Agronomy* 104: 63–77.
- Félix-Faure B, Carrière M, Kalt S (2013) Prendre en compte tous les indicateurs de l'acidité des sols pour l'interprétation et le conseil. : 18.
- Ferreira H, Pinto E, Vasconcelos MW (2021) Legumes as a cornerstone of the transition toward more sustainable agri-food systems and diets in Europe. *Frontiers in Sustainable Food Systems* 5.
- Gandarillas A, Saravia R, Plata G, Quispe R, Ortiz-Romero R, Bazile D, Bertero HD, Nieto C (2015) Principle quinoa pests and diseases. *State of the art report on quinoa* : 192.
- Gangneux C, Akpa-Vinceslas M, Sauvage H, Desaire S, Houot S, Laval K (2011) Fungal, bacterial and plant dsDNA contributions to soil total DNA extracted from silty soils under different farming practices: relationships with chloroform-labile carbon. *Soil biology and biochemistry* 43(2): 431–437.
- Gangneux C, Cannesan M-A, Bressan M, Castel L, Moussart A, Vické-Gibouin M, Driouich A, Trinsoutrot-Gattin I, Laval K (2014) A sensitive assay for rapid detection and quantification of *Aphanomyces euteiches* in soil. *Phytopathology* 104(10): 1138–1147.
- Geisseler D, Scow KM (2014) Long-term effects of mineral fertilizers on soil microorganisms—A review. *Soil Biology and Biochemistry* 75: 54–63.
- Geyer KM, Kyker-Snowman E, Grandy AS, Frey SD (2016) Microbial carbon use efficiency: accounting for population, community, and ecosystem-scale controls over the fate of metabolized organic matter. *Biogeochemistry* 127(2): 173–188.
- Gladstones JS (1998) Distribution, origin, taxonomy, history and importance. *Lupins as crop plants: biology, production and utilization* : 1–37.
- Hafidi M, Ouahmane L, Thioulouse J, Sanguin H, Boumezzough A, Prin Y, Baudoin E, Galiana A, Duponnois R (2013) Managing Mediterranean nurse plants-mediated effects on soil microbial functions to improve rock phosphate solubilization processes and early growth of *Cupressus atlantica* G. *Ecological engineering* 57: 57–64.
- Hartman K, Heijden MG van der, Wittwer RA, Banerjee S, Walser J-C, Schlaeppi K (2018) Cropping practices manipulate abundance patterns of root and soil microbiome members paving the way to smart farming. *Microbiome* 6(1): 1–14.

Hu Z, Yang H, Zhang L, Wang X, Liu G, Wang H, Hua W (2015) A large replum-valve joint area is associated with increased resistance to pod shattering in rapeseed. *Journal of plant research* 128(5): 813–819.

Hugoni M, Luis P, Guyonnet J, Haichar F el Z (2018) Plant host habitat and root exudates shape fungal diversity. *Mycorrhiza* 28(5): 451–463.

Idrissi O, Chafika H, Nsarellah N (2013) Comparaison de lignées avancées de lentille sous stress hydrique durant la phase de floraison et formation des gousses. *Nature & Technology* (8): 53A.

Jadallah SO, ALsaadi AH (2021) Evaluation of Some Mycorrhizae Strains on Improving Nutrients Absorption in Maize Plant Grown in (Sirte–Libya) Saline Soil. *Mediterranean Journal of Basic and Applied Sciences (MJBAS)*.

Jimenez-Lopez JC, Lopez-Valverde FJ, Robles-Bolivar P, Lima-Cabello E, Gachomo EW, Kotchoni SO (2016) Genome-wide identification and functional classification of tomato (*Solanum lycopersicum*) aldehyde dehydrogenase (ALDH) gene superfamily. *PloS one* 11(10): e0164798.

Johannes A, Matter A, Schulin R, Weisskopf P, Baveye PC, Boivin P (2017) Optimal organic carbon values for soil structure quality of arable soils. Does clay content matter? *Geoderma* 302: 14–21.

Kanté M, Riah-Anglet W, Cliquet J-B, Trinsoutrot-Gattin I (2021) Soil Enzyme Activity and Stoichiometry: Linking Soil Microorganism Resource Requirement and Legume Carbon Rhizodeposition. *Agronomy* 11(11): 2131.

Keiblinger KM, Hall EK, Wanek W, Szukics U, Hämmerle I, Ellersdorfer G, Böck S, Strauss J, Sterflinger K, Richter A, Zechmeister-Boltenstern S (2010) The effect of resource quantity and resource stoichiometry on microbial carbon-use-efficiency: Resource quantity/quality drives microbial C-use-efficiency. *FEMS Microbiology Ecology* : no-no.

Khazaei H, Subedi M, Nickerson M, Martínez-Villaluenga C, Frias J, Vandenberg A (2019) Seed protein of lentils: Current status, progress, and food applications. *Foods* 8(9): 391.

Koide RT, Peoples MS (2012) On the nature of temporary yield loss in maize following canola. *Plant and Soil* 360(1): 259–269.

Kotova V, Tsvetkova N (1980) Effectiveness of chemical control measures against *Aphanomyces* root rot of peas (abstract). *Rev Plant Pathol* 59: 342.

Kraut-Cohen J, Zolti A, Shaltiel-Harpaz L, Argaman E, Rabinovich R, Green SJ, Minz D (2020) Effects of tillage practices on soil microbiome and agricultural parameters. *Science of the Total Environment* 705: 135791.

Laloum Y (2017) .

Laloum Y, Gangneux C, Gügi B, Lanoue A, Munsch T, Blum A, Gauthier A, Trinsoutrot-Gattin I, Boulogne I, Viché M, Driouich A, Laval K, et al. (2021) Faba bean root exudates alter pea root colonization by the oomycete *Aphanomyces euteiches* at early stages of infection. *Plant Science* 312: 111032.

Laval K, Mougin C, Akpa M, Barray S, Thoisy-Dur J-C, Gangneux C, Lebrun J, Legras M, Pelletier P, Plassart P, Taibi S, Trinsoutrot-Gattin I (2009) Un premier pas vers la compréhension des données biologiques. *Etude et Gestion des Sols* 16(3/4): 275.

Lee YP, Mori TA, Sipsas S, Barden A, Puddey IB, Burke V, Hall RS, Hodgson JM (2006) Lupin-enriched bread increases satiety and reduces energy intake acutely. *The American journal of clinical nutrition* 84(5): 975–980.

Lepse L, Dane S, Zeipiņa S, Domínguez-Perles R, Rosa EA (2017) Evaluation of vegetable–faba bean (*Vicia faba* L.) intercropping under Latvian agro-ecological conditions. *Journal of the Science of Food and Agriculture* 97(13): 4334–4342.

Levavasseur F, Martin P, Bouty C, Barbottin A, Bretagnolle V, Thérond O, Scheurer O, Piskiewicz N (2016) RPG Explorer: A new tool to ease the analysis of agricultural landscape dynamics with the Land Parcel Identification System. *Computers and Electronics in Agriculture* 127: 541–552.

Lima-Cabello E, Morales-Santana S, León J, Alché V, Clemente A, Alché JD, Jimenez-Lopez JC (2018) Narrow-leafed lupin (*Lupinus angustifolius* L.) seed β -conglutins reverse the induced insulin resistance in pancreatic cells. *Food & function* 9(10): 5176–5188.

Marraccini E, Gotor AA, Scheurer O, Leclercq C (2020) An Innovative Land Suitability Method to Assess the Potential for the Introduction of a New Crop at a Regional Level. *Agronomy* 10(3): 330.

Menon RR, Kumari S, Viver T, Rameshkumar N (2020) *Flavobacterium pokkali* sp. nov., a novel plant growth promoting native rhizobacteria isolated from pokkali rice grown in coastal saline affected agricultural regions of southern India, Kerala. *Microbiological Research* 240: 126533.

Morot-Gaudry J-F, Orsel M, Diaz C, Daniel-Vedele F, Masclaux-Daubresse C (2014) Absorption et assimilation du nitrate et recyclage de l'azote organique chez les plantes: intérêt pour le colza. *Oléagineux, Corps gras, Lipides* 13(6).

Oyarzun P, Gerlagh M, Hoogland AE, Vos I (1990) Seed treatment of peas with fosetyl-Al against *Aphanomyces euteiches*. *Netherlands Journal of Plant Pathology* 96(5): 301–311.

Panettieri M, Knicker H, Murillo JM, Madejón E, Hatcher PG (2014) Soil organic matter degradation in an agricultural chronosequence under different tillage regimes evaluated by organic matter pools, enzymatic activities and CPMAS ^{13}C NMR. *Soil Biology and Biochemistry* 78: 170–181.

Panhwar QA, Jusop S, Naher UA, Othman R, Razi MI (2013) Application of potential phosphate-solubilizing bacteria and organic acids on phosphate solubilization from phosphate rock in aerobic rice. *The Scientific World Journal* 2013.

Pastorelli R, Vignozzi N, Landi S, Piccolo R, Orsini R, Seddaiu G, Roggero PP, Pagliai M (2013) Consequences on macroporosity and bacterial diversity of adopting a no-tillage farming system in a clayish soil of Central Italy. *Soil Biology and Biochemistry* 66: 78–93.

Piotrowska-Dlugosz A, Lemanowicz J, Dlugosz J (2020) The spatial pattern and seasonal changes in the soil phosphorus content in relation to the phosphatase activity: A case study of Luvisols. *Archives of Agronomy and Soil Science* 66(11): 1583–1597.

Quillévéré-Hamard A, Le Roy G, Moussart A, Baranger A, Andrivon D, Pilet-Nayel M-L, Le May C (2018) Genetic and pathogenicity diversity of *Aphanomyces euteiches* populations from pea-growing regions in France. *Frontiers in plant science* 9: 1673.

Radajewski S, Ineson P, Parekh NR, Murrell JC (2000) Stable-isotope probing as a tool in microbial ecology. *Nature* 403(6770): 646–649.

- Redecker D, Schüßler A (2014) 9 Glomeromycota. In: Systematics and Evolution Springer, p. 251–269.
- Rezgui C, Riah-Anglet W, Benoit M, Bernard PY, Laval K, Trinsoutrot-Gattin I (2020) Impacts of the Winter Pea Crop (Instead of Rapeseed) on Soil Microbial Communities, Nitrogen Balance and Wheat Yield. *Agriculture* 10(11): 548.
- Rezgui C, Trinsoutrot-Gattin I, Benoit M, Laval K, Wassila R-A (2021) Linking changes in the soil microbial community to C and N dynamics during crop residue decomposition. *Journal of Integrative Agriculture* 20(11): 3039–3059.
- Ron AMD (2015) Grain Legumes. Springer, .
- Ropitiaux M, Bernard S, Schapman D, Follet-Gueye M-L, Vicré M, Boulogne I, Driouich A (2020) Root Border Cells and Mucilage Secretions of Soybean, Glycine Max (Merr) L.: Characterization and Role in Interactions with the Oomycete Phytophthora Parasitica. *Cells* 9(10): E2215.
- Roux XL, Schmid B, Poly F, Barnard RL, Niklaus PA, Guillaumaud N, Habekost M, Oelmann Y, Philippot L, Salles JF, Schloter M, Steinbeiss S, et al. (2013) Soil Environmental Conditions and Microbial Build-Up Mediate the Effect of Plant Diversity on Soil Nitrifying and Denitrifying Enzyme Activities in Temperate Grasslands. *PLOS ONE* 8(4): e61069.
- Rumberger A, Marschner P (2003) 2-Phenylethylisothiocyanate concentration and microbial community composition in the rhizosphere of canola. *Soil Biology and Biochemistry* 35(3): 445–452.
- Santoyo G, Orozco-Mosqueda M del C, Govindappa M (2012) Mechanisms of biocontrol and plant growth-promoting activity in soil bacterial species of Bacillus and Pseudomonas: a review. *Biocontrol Science and Technology* 22(8): 855–872.
- Sauvage H, Moussart A, Bois F, Tivoli B, Barray S, Laval K (2007) Development of a molecular method to detect and quantify Aphanomyces euteiches in soil. *FEMS microbiology letters* 273(1): 64–69.
- Schlatter DC, Hansen JC, Schillinger WF, Sullivan TS, Paulitz TC (2019) Common and unique rhizosphere microbial communities of wheat and canola in a semiarid Mediterranean environment. *Applied Soil Ecology* 144: 170–181.
- Schmidt R, Gravuer K, Bossange AV, Mitchell J, Scow K (2018) Long-term use of cover crops and no-till shift soil microbial community life strategies in agricultural soil. *Plos one* 13(2): e0192953.
- Schneider A, Huyghe C (2015) Les Légumineuses Pour Des Systèmes Agricoles et Alimentaires Durables. éditions Quae, Synthèses (Quae), 978-2-7592-2334-3.
- Sharma M, Gupta SK (2014) Approaches and Trends in Plant Disease Management. Scientific Publishers, .
- Siczek A, Frąc M, Gryta A, Kalembasa S, Kalembasa D (2020) Variation in soil microbial population and enzyme activities under faba bean as affected by pentachlorophenol. *Applied Soil Ecology* 150: 103466.
- Siczek A, Frąc M, Kalembasa S, Kalembasa D (2018) Soil microbial activity of faba bean (Vicia faba L.) and wheat (Triticum aestivum L.) rhizosphere during growing season. *Applied Soil Ecology* 130: 34–39.
- Soltani A-A, Khavazi K, Asadi-Rahmani H, Omidvari M, Dahaji PA, Mirhoseyni H (2010) Plant growth promoting characteristics in some Flavobacterium spp. isolated from soils of Iran. *Journal of Agricultural Science* 2(4): 106.

- Stoddard FL, Balko C, Erskine W, Khan HR, Link W, Sarker A (2006) Screening techniques and sources of resistance to abiotic stresses in cool-season food legumes. *Euphytica* 147(1): 167–186.
- Sun Q, Wang R, Wang Y, Du L, Zhao M, Gao X, Hu Y, Guo S (2018) Temperature sensitivity of soil respiration to nitrogen and phosphorous fertilization: does soil initial fertility matter? *Geoderma* 325: 172–182.
- Talhinhas P, Baroncelli R, Le Floch G (2016) Anthracnose of lupins caused by *Colletotrichum lupini*: A recent disease and a successful worldwide pathogen. *Journal of Plant Pathology* : 5–14.
- Thioye B, Legras M, Castel L, Hirissou F, Chaftar N, Trinsoutrot-Gattin I (2021) Understanding arbuscular mycorrhizal colonization in walnut plantations: The contribution of cover crops and soil microbial communities. *Agriculture* 12(1): 1.
- Thomludi E-E, Tsalgatidou PC, Douka D, Spantidos T-N, Dimou M, Venieraki A, Katinakis P (2019) Multistrain versus single-strain plant growth promoting microbial inoculants-The compatibility issue. *Hellenic Plant Protection Journal* 12(2): 61–77.
- Tian T, Reverdy A, She Q, Sun B, Chai Y (2020) The role of rhizodeposits in shaping rhizomicrobiome. *Environmental Microbiology Reports* 12(2): 160–172.
- Tian Y, Cao F, Wang G (2013) Soil microbiological properties and enzyme activity in Ginkgo–tea agroforestry compared with monoculture. *Agroforestry systems* 87(5): 1201–1210.
- Tilman D, Cassman KG, Matson PA, Naylor R, Polasky S (2002) Agricultural sustainability and intensive production practices. *Nature* 418(6898): 671–677.
- Venter ZS, Jacobs K, Hawkins H-J (2016) The impact of crop rotation on soil microbial diversity: A meta-analysis. *Pedobiologia* 59(4): 215–223.
- Wahbi S, Prin Y, Thioulouse J, Sanguin H, Baudoin E, Maghraoui T, Oufdou K, Le Roux C, Galiana A, Hafidi M (2016) Impact of wheat/faba bean mixed cropping or rotation systems on soil microbial functionalities. *Frontiers in Plant Science* 7: 1364.
- White CM, Weil RR (2010) Forage radish and cereal rye cover crop effects on mycorrhizal fungus colonization of maize roots. *Plant and soil* 328(1): 507–521.
- Wright SF, Upadhyaya A (1998) A survey of soils for aggregate stability and glomalin, a glycoprotein produced by hyphae of arbuscular mycorrhizal fungi. *Plant and soil* 198(1): 97–107.
- Wu L, Chang K-F, Hwang S-F, Conner R, Fredua-Agyeman R, Feindel D, Strelkov SE (2019) Evaluation of host resistance and fungicide application as tools for the management of root rot of field pea caused by *Aphanomyces euteiches*. *The Crop Journal* 7(1): 38–48.
- Xia X, Zhang P, He L, Gao X, Li W, Zhou Y, Li Z, Li H, Yang L (2019) Effects of tillage managements and maize straw returning on soil microbiome using 16S rDNA sequencing. *Journal of integrative plant biology* 61(6): 765–777.
- Yansheng C, Fengliang Z, Zhongyi Z, Tongbin Z, Huayun X (2020) Biotic and abiotic nitrogen immobilization in soil incorporated with crop residue. *Soil and Tillage Research* 202: 104664.
- Yevdokimov IV, Saha S, Blagodatsky SA, Kudeyarov VN (2005) Nitrogen immobilization by soil microorganisms depending on nitrogen application rates. *Eurasian Soil Sci* 38(5): 516–523.

ANNEXES

Annexe 1 : Arbre d'évaluation des trois composantes de la durabilité (composante économique, environnementale et sociale) à l'échelle des systèmes de culture

Dimension environnementale	Contribution à la qualité du milieu	Contribution à la qualité de l'eau	Maîtrise des pertes de pesticides eaux	Maîtrise des pertes en eaux profondes	
				Maîtrise des pertes en eaux superficielles	
				Maîtrise des pertes de N03	
			Maîtrise des pertes de P	Gestion des amendements	Quantité de P apportées en moyenne
				Maîtrise de l'érosion	Sensibilité du milieu
					Defauts de couverture du sol en périodes à risque (érosion)
					Effet du travail du sol
					Maîtrise de l'état structural du sol
				Teneur en P du sol	Etat de fertilité initiale P
		Contribution à la qualité de l'air		Maîtrise des émissions de NH3	
				Maîtrise des émissions de N2O	
				Maîtrise des émissions de pesticides dans l'air	
	Pression sur les ressources abiotiques	Préservation de la qualité du sol	Maîtrise du statut organique	Taux de matière organique	
				Apports en matière organique	
	Conservation de la biodiversité	Pression eau		Maîtrise de l'érosion	
				Consommation d'eau en période critique	
		Conservation de la macrofaune	Conservation des insectes volants	Pression phosphore	
				Effet de la diversité des familles cultivées	
			Conservation de la macrofaune du sol	IFT insecticides	
				Effet du travail du sol	
		Conservation de la flore	Abondance floristique	Apports en matière organique	
				IFT insecticides	
		Conservation des micro-organismes du sol	Diversité floristique	Maîtrise des adventices	
				Effet de la diversité des périodes d'implantation	
				Utilisation d'herbicide à large spectre	
				Effet des pesticides	
				Effet de la diversité des familles cultivées	
				Apports en matières organiques	

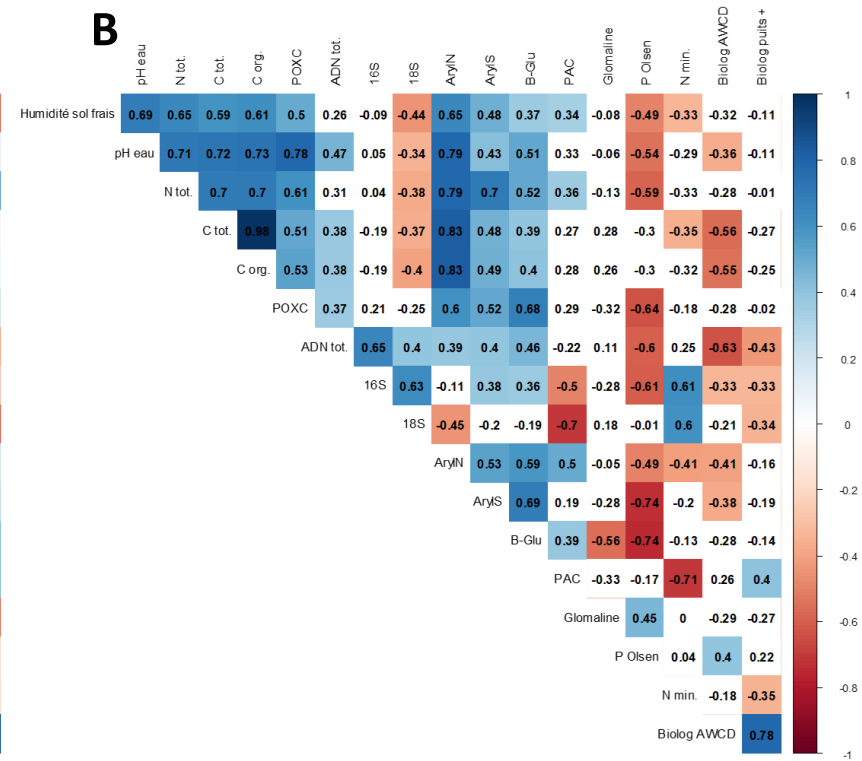
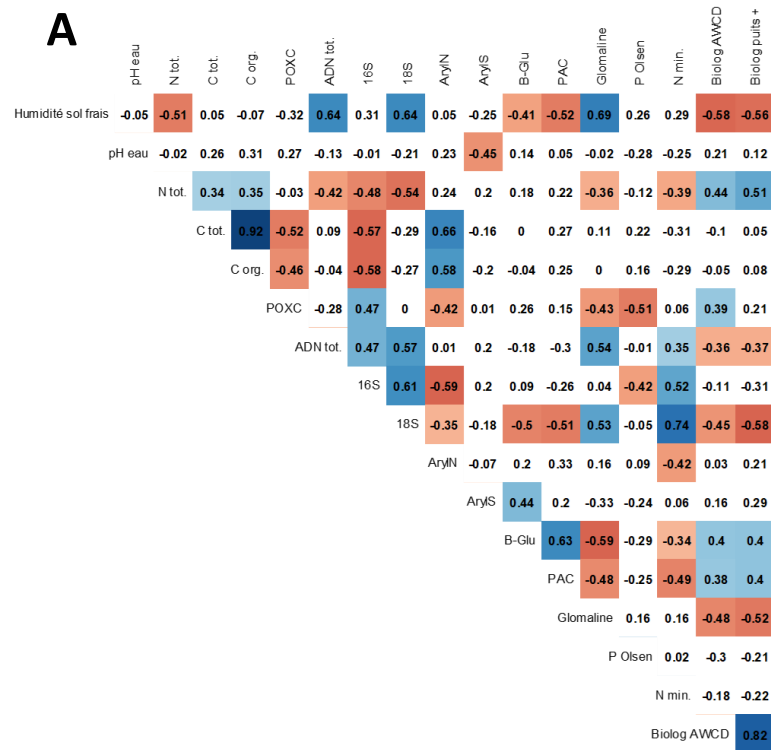
Annexe 2 : Teneurs en argile, limon et sable des sols des microparcelles

	EURE				SEINE-MARITIME			
	Lupin	Lentille	Pois	Féverole	Lupin	Lentille	Pois	Féverole
Argile (%)	5.18 ± (0.54) ^B	7.51 ± (0.59) ^A	5.71 ± (0.47) ^B	6.2 ± (0.49) ^B	4.92 ± (0.61) ^B	8.05 ± (2.59) ^A	5.56 ± (0.2) ^{AB}	5.57 ± (0.63) ^{AB}
Limon (%)	84.92 ± (0.78) ^B	81.55 ± (0.87) ^C	85.6 ± (1.2) ^{AB}	86.43 ± (0.17) ^A	82.02 ± (6.28) ^{NS}	85.44 ± (4.14) ^{NS}	84.51 ± (1.49) ^{NS}	83.85 ± (0.68) ^{NS}
Sable (%)	9.91 ± (0.26) ^A	10.94 ± (1.31) ^{AB}	8.69 ± (0.95) ^{BC}	7.36 ± (0.66) ^C	13.07 ± (6.84) ^A	6.51 ± (1.61) ^B	9.93 ± (1.68) ^A	10.57 ± (0.51) ^A

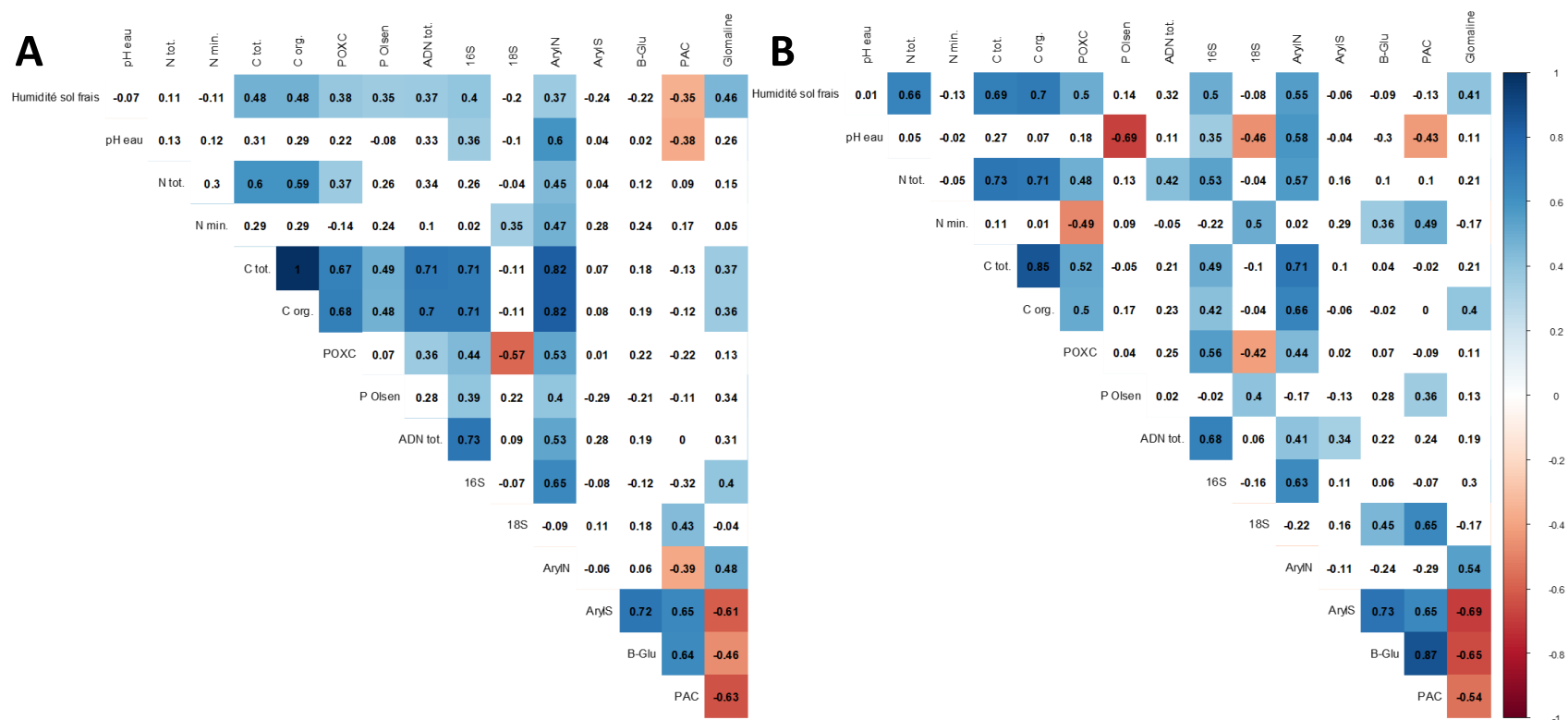
Les tests statistiques ont été réalisés avec le package « nparcomp » de RStudio

Annexe 3 : Effet de la variabilité temporelle (date de prélèvement du sol) en microparcelles sur chaque variable physico-chimique et microbiologique mesurée.

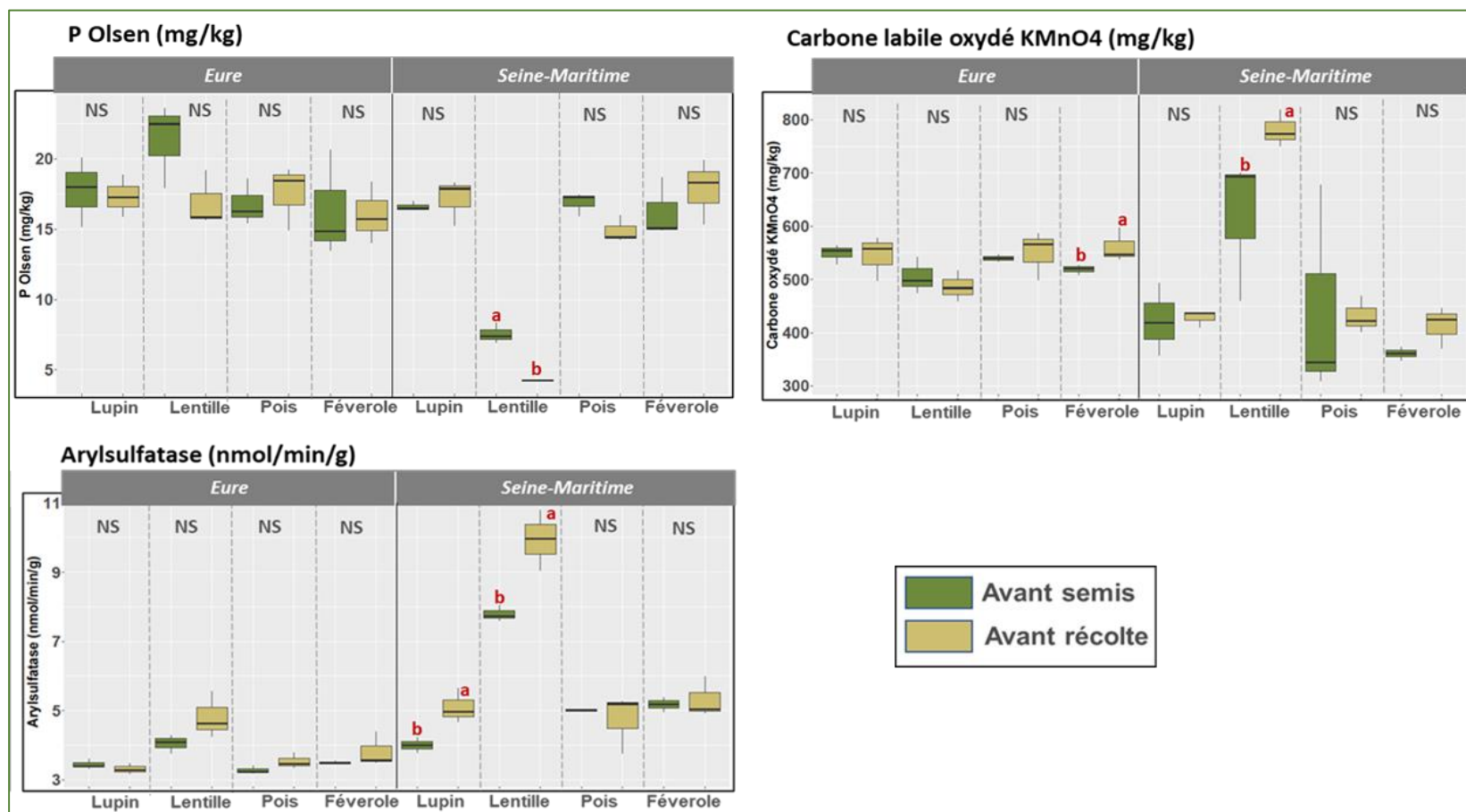
Département	Variables mesurées	Lupin						Lentille						Pois						Féverole								
		Avant semis		Avant récolte		Après récolte		Avant semis		Avant récolte		Après récolte		Avant semis		Avant récolte		Après récolte		Avant semis		Avant récolte		Après récolte				
EURE	Humidité sol frais (%)	16,82	0,12	a	14,48	0,82	c	16,43	0,28	b	16,93	0,07	a	10,80	1,50	c	15,62	0,25	b	16,16	1,32	b	14,00	0,52	c	18,19	0,50	a
	pH eau	7,69	0,1	ns	7,75	0,03	ns	7,7	0,04	ns	6,47	0,05	b	6,88	0,23	a	6,82	0,08	a	7,69	0,04	b	7,79	0,04	a	7,39	0,62	b
	C total (%)	0,76	0,45	ab	0,94	0,07	b	1,1	0,07	a	0,54	0,27	c	0,84	0,07	b	1,18	0,02	a	0,71	0,02	c	0,87	0,04	b	1,13	0,08	a
	C org (%)	0,75	0,45	ab	1,07	0,1	b	1,1	0,06	a	0,53	0,27	c	1,09	0,11	b	1,17	0,03	a	0,7	0,02	c	0,96	0,05	b	1,11	0,08	a
	Carbone oxydé KMnO4 (mg/kg)	548,91	17,93	a	544,69	41,49	a	397,63	60,25	b	505,17	34,44	a	486,9	29,29	a	397,35	35,22	b	539,83	6,41	a	550,49	45,61	a	441,34	9,99	b
	N total (%)	4,00E-02	5,06E-03	ns	7,22E-02	2,42E-02	ns	5,57E-02	1,85E-02	ns	4,29E-02	2,46E-02	ns	7,73E-02	1,22E-02	ns	6,93E-02	1,02E-02	ns	3,57E-02	2,03E-02	b	6,94E-02	8,33E-03	a	6,15E-02	1,12E-02	a
	N minéral (mg/kg)	14,22	2,2	a	5,48	2,93	b	6,79	0,79	b	15,68	0,71	a	2,93	0,97	b	13,65	3,1	a	14,37	4,43	a	4,68	1,1	b	2,49	0,81	c
	P Olsen (mg/kg)	69,70	10,89	ns	67,84	6,52	ns	94,42	23,23	ns	85,41	13,14	ns	65,92	8,69	ns	81,24	16,75	ns	65,30	7,21	ns	68,76	10,06	ns	89,20	20,05	ns
	ADN total (µg/g)	14,75	1,34	a	9,57	1,47	b	13,05	1,23	a	14	2,31	ns	12,38	1,62	ns	14,32	2,44	ns	13,87	1,34	a	10,23	1,31	b	14,05	2,97	ab
	ADN 18S (copies 18S /g)	3,25E+08	5,51E+07	a	1,49E+07	3,82E+06	c	4,95E+07	9,96E+06	b	2,09E+08	6,91E+07	a	1,14E+07	3,15E+06	c	5,51E+07	2,72E+07	b	2,99E+08	5,69E+07	a	1,37E+07	1,64E+06	c	2,57E+07	6,87E+06	b
	ADN 16S (copies 16S /g)	3,8E+10	4,78E+09	a	1,77E+09	3,61E+08	b	1,38E+09	1,60E+08	b	2,49E+10	7,86E+09	a	2,02E+09	5,64E+08	b	1,33E+09	3,67E+08	b	3,36E+10	3,34E+09	a	1,62E+09	1,36E+08	b	1,57E+09	5,57E+08	b
	Arylamidase (nmol/min/g)	5,5	0,44	c	6,86	0,5	b	8,68	0,53	a	5,75	0,63	b	6,38	0,4	b	9,8	3,75	a	6,13	0,31	b	7,94	1	a	8,61	0,13	ab
	Arylsulfatase (nmol/min/g)	3,44	0,15	ns	3,31	0,16	ns	3,16	0,26	ns	4,05	0,27	ab	4,81	0,67	a	3,89	0,16	b	3,28	0,12	ns	3,53	0,23	ns	3,3	0,47	ns
	Béta-Glucosidase (nmol/min/g)	18,38	0,63	ns	20,3	2,83	ns	18,34	0,14	ns	18,53	0,65	b	21,11	0,19	a	16,78	1,42	b	17,11	1,11	b	20,76	2,66	a	16,68	2,26	ab
	PAC (nmol/min/g)	39,49	4,04	ab	44,03	1,43	a	41,7	0,46	b	37,46	2,38	b	47,98	7,15	ab	41,58	0,59	a	34,92	3,34	c	41,42	3,69	a	38,05	0,38	b
	Glomaline (mg/g)	10,00	1,62	b	4,83	0,55	c	15,41	2,74	a	7,53	4,15	ab	4,84	0,45	b	14,80	4,34	a	20,59	4,43	a	5,18	0,28	b	18,66	0,60	a
SEINE-MARTIME	Humidité sol frais (%)	16,42	0,10	c	19,18	0,37	a	17,99	0,41	b	19,72	4,50	ns	21,95	0,41	ns	21,70	0,95	ns	17,93	0,22	b	19,13	0,16	a	18,73	0,28	a
	pH eau	6,16	0,13	ns	6,23	0,1	ns	6,17	0,06	ns	8,12	0,01	b	8,26	0,01	a	8,24	0,03	a	6,04	0,1	b	6,49	0,1	a	6,41	0,06	a
	C total (%)	0,73	0,04	c	1,05	0,03	b	1,21	0,02	a	10,16	0,18	b	9,62	0,13	c	11,06	0,15	a	0,78	0,06	c	1,12	0,1	b	1,27	0,05	a
	C org (%)	0,72	0,03	c	1,59	0,18	b	1,2	0,02	a	2,5	0,2	ns	3,12	0,27	ns	2,54	0,07	ns	0,78	0,06	c	1,52	0,28	b	1,27	0,04	a
	Carbone oxydé KMnO4 (mg/kg)	423,17	67,9	ab	428,17	15,77	a	364,46	11,62	b	618,3	136,35	b	781,11	34,54	a	540,48	16,31	b	444,31	203,32	ab	431,42	34,49	a	390,76	2,4	b
	N total (%)	9,26E-03	0,00E+00	b	7,06E-02	0,00E+00	a	6,68E-02	1,72E-02	a	1,26E-01	5,52E-03	b	1,57E-01	6,22E-03	a	1,44E-01	1,14E-02	a	6,77E-02	1,75E-02	b	1,23E-01	0,00E+00	a	8,05E-02	1,66E-02	b
	N minéral (mg/kg)	16,72	2,33	a	2,52	0,84	c	9,08	4,78	b	17,34	2,94	a	3,99	1,36	b	0,47	0,17	c	13,41	1,41	a	2,73	0,39	b	1,79	1,48	b
	P Olsen (mg/kg)	64,77	1,38	b	66,96	7,23	b	91,20	3,04	a	24,71	3,04	a	10,27	0,07	c	20,28	0,77	b	65,95	3,55	b	57,04	4,11	c	94,52	20,07	a
	ADN total (µg/g)	16,91	1,07	a	9,83	2,3	b	12,15	1,31	b	31,84	7,27	a	17,05	1,43	c	24,05	1,72	b	12,12	5,16	ns	10,58	1,06	ns	11,48	1,33	ns
	ADN 18S (copies 18S /g)	4,19E+08	1,20E+08	a	8,18E+06	3,69E+06	c	2,33E+07	6,24E+06	b	2,65E+08	5,75E+07	a	7,68E+06	1,90E+06	c	1,69E+07	2,93E+06	b	2,96E+08	7,79E+07	a	1,24E+07	1,61E+06	b	1,34E+07	2,87E+06	b
	ADN 16S (copies 16S /g)	4,03E+10	1,41E+09	a	1,32E+09	1,38E+08	b	1,29E+09	1,57E+08	b	7,97E+10	9,72E+09	a	2,48E+09	1,24E+07	b	2,30E+09	1,40E+08	c	3,83E+10	9,95E+09	a	1,64E+09	3,46E+08	b	1,12E+09	2,91E+07	c
	Arylamidase (nmol/min/g)	1,52	0,08	c	4,13	0,66	b	4,93	0,12	a	5,56	0,4	b	18,14	1,63	a	16,47	1,47	a	1,45	0,16	c	5,28	0,25	a	5,02	0,07	b
	Arylsulfatase (nmol/min/g)	4	0,22	b	5,1	0,5	a	4,66	0,27	a	7,8	0,23	b	9,94	0,87	a	8,21	0,79	ab	5,01	0,01	b	4,74	0,84	ab	4,61	0,24	a
	Béta-Glucosidase (nmol/min/g)	13,46	1,13	b	15,11	0,59	a	13,39	1,8	ab	20,26	2,17	b	25,02	1,86	a	16,45	0,72	c	12,71	0,68	b	14,8	0,96	a	11,26	1,47	b
	PAC (nmol/min/g)	32,08	1,78	b	47,63	3,64	a	44,23	1,86	a	27,09	2,27	b	55,75	5,95	a	50,76	7	a	33,63	1,35	c	55,22	11,04	a	40,49	1,91	b
	Glomaline (mg/g)	6,47	0,79	b	3,91	0,22	c	12,21	5,64	a	5,67	1,25	b	3,92	0,42	c	11,78	2,56	a	4,86	1,12	b	3,88	0,17	c	15,11	1,51	a



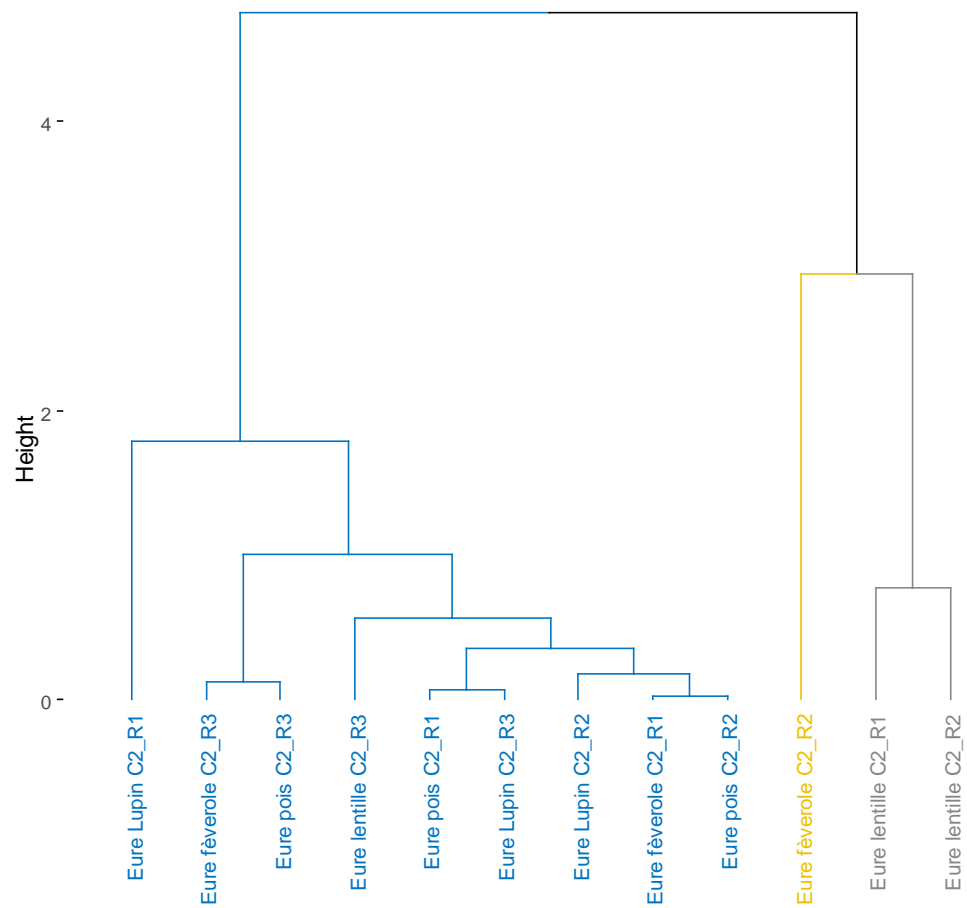
Annexe 4 : Corrélations de Spearman entre les variables mesurées. Les 3 dates de mesures sont prises en compte dans l'Eure (A) et en Seine-Maritime (B).



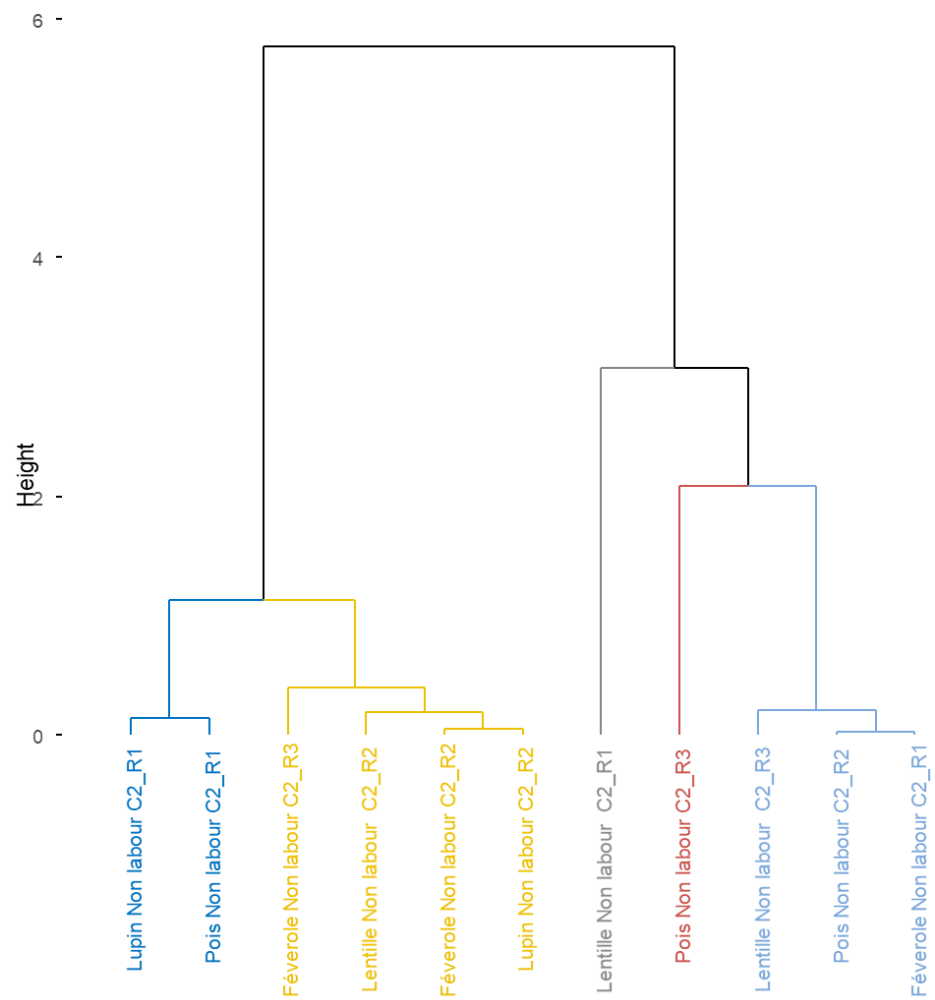
Annexe 5 : Corrélations de Spearman entre les variables mesurées. Les 3 dates de mesures sont prises en compte en non-labour (A) et en labour (B).



Annexe 6 : Effet de l'implantation des légumineuses sur Polsen, C labile, le niveau de l'activités arylsulfatase dans les sols des microparcelles dans l'Eure et dans la Seine-Maritime



Annexe 7 : Classification ascendante hiérarchique pour tester l'effet type de culture dans les sols des microparcelles dans l'Eure



Annexe 8 : Classification ascendante hiérarchique pour tester l'effet type de culture dans les sols des parcelles agriculteurs en non-lab

Annexe 9 : un exemple détaillé d'un profil de durabilité ainsi qu'une analyse par dimension des forces et des faiblesses réalisé pour chaque culture pour chaque agriculteur

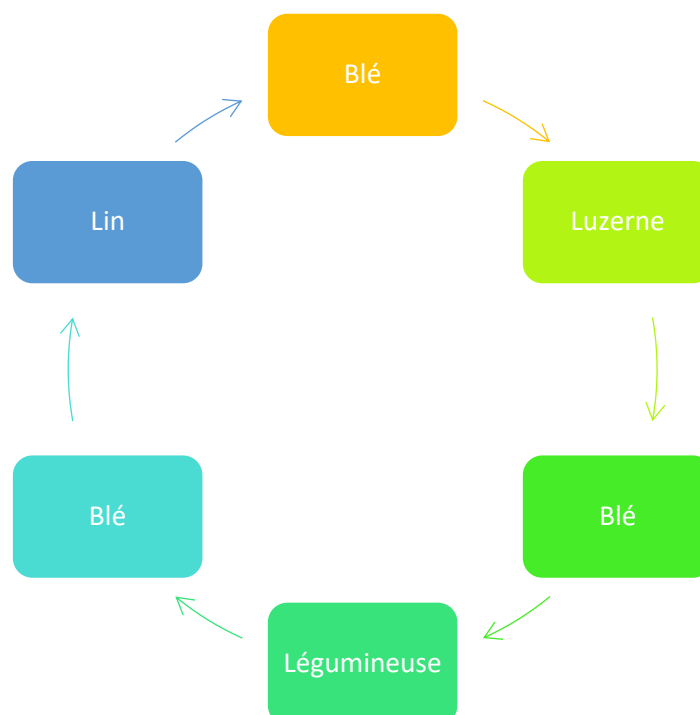
Prénom nom (exploitation – quinoa, labour)

A propos de l'exploitation...

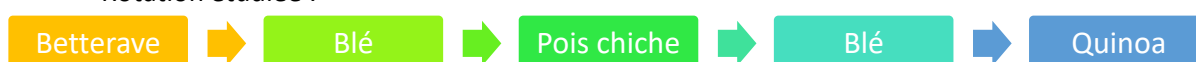
- Exploitation localisée dans le (27)
- Atelier élevage (poules pondeuses en plein air)
- SAU de l'exploitation de 168 hectares, répartis de la façon suivante pour la campagne 2021 (valeurs en hectares, dont 2 hectares de quinoa, 2 hectares de caméline, 1 hectare de maïs pop-corn et 1 hectare de sésame)



- Rotation principale :



- Rotation étudiée :



Etude de la contribution au développement durable (MASC)

Points forts	Points faibles
<p><u>Dimension économique :</u></p> <ul style="list-style-type: none"> - Maîtrise des adventices importante avec la présence de labour et l'effet des méthodes de lutte en général (avec un travail du sol régulier, l'utilisation de cultures couvrantes et l'utilisation relativement importante d'herbicides en n-3 et n-4, avant passage en système bio). - Contribution au développement économique très forte grâce à une bonne qualité sanitaire des produits (travail du sol et rotation évitant la succession de poacées, favorable à l'apparition et au développement de la fusariose) et une forte contribution à l'émergence de nouvelles filières (présence de pois chiche et de quinoa dans la rotation). <p><u>Dimension sociale :</u></p> <ul style="list-style-type: none"> - Satisfaction des attentes de la société importante grâce à la contribution à l'emploi élevée sur l'exploitation (1 alternant et 3 salariés) et la bonne fourniture de matières 1ères (rendement obtenu en moyenne plus élevé que la moyenne départementale l'année concernée selon Agreste). <p><u>Dimension environnementale :</u></p> <ul style="list-style-type: none"> - Faible pression sur les ressources abiotiques, avec peu d'apports de phosphore minéral sur la rotation (seulement 80 unités en n-2) et l'absence d'irrigation. - Conservation de la biodiversité moyenne : effet du travail du sol, de la maîtrise importante des adventices et de la faible diversité de famille cultivées compensés par la non-utilisation de produits insecticides et une faible utilisation de pesticides en général (concentrés lors des 2 premières années de la rotation). 	<p><u>Dimension environnementale :</u></p> <ul style="list-style-type: none"> - Maîtrise de l'érosion faible, avec une exploitation en zone assez sensible à l'érosion et un défaut important de couverture en période à risque (50% de la rotation), et avec apports systématiques d'amendements (organiques ou non) causant une faible maîtrise des pertes de phosphore dans l'eau. - Préservation de la qualité du sol faible, par la faible maîtrise de l'érosion (cf. ci-dessus) et la maîtrise du statut organique faible à moyenne (avec un taux de MO assez bas de 1.3%, compensé par un apport assez régulier en amendements organiques sur la parcelle). - Famille cultivées peu diversifiées (betterave et quinoa : chénopodiacées + 2 années de blé) et absence de couvert d'interculture (généralement implantés sur une durée plus courte que les autres cultures de la rotation, mais ayant tout de même un impact sur la pression de maladies et des ravageurs). - Conservation de la flore moyenne, avec la maîtrise des adventices importante (cf. Points forts Dimension économique).

Contribution au développement durable	Dimension économique	Capacité productive à long terme	Maitrise de la fertilité physico-chimique	Maitrise du statut acido-basique du sol		
				Maitrise de l'état structural du sol	Dégradation de la structure de sol	Proportion de cultures récoltées dans de mauvaises conditions
					Régénération de la structure du sol	Aptitude du sol à la fissuration
				Maitrise de la fertilité phospho-potassique	Maitrise de la fertilité phosphorique	Régénération mécanique de la structure
					Maitrise de la fertilité potassique	Etat de fertilité initiale de P
						Pouvoir tampon du sol P
						Etat de fertilité initiale de K
			Maitrise des bio-agresseurs	Maitrise des maladies et des ravageurs	Pouvoir tampon du sol K	
					Effet de la diversité des familles cultivées	
					Effet du travail du sol (résidus des culture)	
				Maitrise des adventices	Effet des méthodes de lutte (maladies et ravageurs)	
					Effet de la diversité des périodes d'implantation	
					Effet du labour	
					Effet des méthodes de lutte (adventices)	
	Contribution au développement économique	Qualité des produits	Qualité sanitaire			
			Qualité technologique et esthétique des produits			
		Contribution à l'émergence de filière				
	Dimension sociale	Satisfaction des attentes de la société	Contribution à l'emploi			
			Fourniture de matière 1ères			
		Satisfaction des attentes de l'agriculteur	Facilité de mise en œuvre	Complexité des itinéraires techniques		
				Temps de veille technico-économique		
			Qualité des conditions de travail	Risque pour la santé de l'applicateur		
				Maitrise des pertes de pesticides eaux	Maitrise des pertes en eaux profondes	
					Maitrise des pertes en eaux superficielles	
	Dimension environnementale	Contribution à la qualité du milieu	Contribution à la qualité de l'eau	Maitrise des pertes de P	Maitrise des pertes de NO3	
					Gestion des amendements	Quantité de P apportées en moyenne
				Maitrise de l'érosion	Effet du SDC	Sensibilité du milieu
						Defauts de couverture du sol en périodes a risque (érosion)
						Effet du travail du sol
					Maitrise de l'état structural du sol	
					Etat de fertilité initiale P	
			Contribution à la qualité de l'air	Maitrise des émissions de NH3		
				Maitrise des émissions de N2O		
				Maitrise des émissions de pesticides dans l'air		
			Préservation de la qualité du sol	Maitrise du statut organique	Taux de matière organique	
					Apports en matière organique	
				Maitrise de l'érosion		
			Pression sur les ressources abiotiques	Pression eau	Consomation d'eau en période critique	
					Pression phosphore	
			Conservation de la biodiversité	Conservation de la macrofaune	Conservation des insectes volants	Effet de la diversité des familles cultivées
IFT Insecticides						
Conservation de la macrofaune du sol		Effet du travail du sol				
		Apports en matière organique				
		IFT Insecticides				
Conservation de la flore		Abondance floristique		Maitrise des adventices		
		Diversité floristique		Effet de la diversité des périodes d'implantation		
				Utilisation d'herbicide à large spectre		
Conservation des micro-organismes du sol	Effet des pesticides					
	Effet de la diversité des familles cultivées					
	Apports en matières organiques					

Annexe 10 : un exemple détaillé d'une fiche agriculteur pour la restitution des résultats aux agriculteurs



Analyses de terre

Glossaire

Indicateurs physico-chimiques

Classe de texture du sol : Déterminée à partir des % de sable, % de limon et % d'argile

pH : Mesure de l'acidité ou l'alcalinité du sol.

Azote total : somme de l'azote organique et l'azote minéral

Azote minéral : Azote du sol assimilable par les plantes et les microorganismes

Carbone total : Somme du carbone organique et du carbone minéral

Carbone organique : Carbone présent dans la matière organique du sol

Carbone oxydable : Carbone disponible, assimilable par les microorganismes du sol

C/N: Rapport entre carbone total et l'azote total dans le sol

Phosphore Olsen (P_2O_5): Phosphore disponible assimilable par les plantes et les microorganismes

Indicateurs microbiologiques

Indicateurs d'abondance des microorganismes

Quantité de microorganismes totaux

ADN total : Indicateur qui renseigne sur la quantité des microorganismes totaux dans le sol

Quantité de champignons totaux

ADNr 18S : Indicateur qui renseigne sur la quantité de champignons dans le sol

Quantité de champignons mycorhiziens

Intensité de mycorhization : Indicateur qui renseigne sur la quantité de champignons mycorhiziens dans les racines des plantes, cette mesure est possible quand la plante est en place

Glomaline : Indicateur qui renseigne sur la quantité de champignons mycorhiziens à arbuscules dans le sol

Quantité de bactéries totales

ADNr 16S : Indicateur qui renseigne sur la quantité de bactéries dans le sol

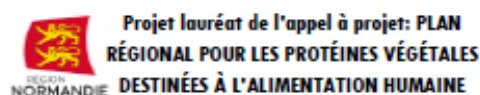
Indicateurs d'activité des microorganismes

β -glucosidase : Activité qui renseigne sur la minéralisation du carbone

Arylamidase : Activité qui renseigne sur la minéralisation de l'azote

Arylsulfatase : Activité qui renseigne sur la minéralisation du soufre

Phosphatase acide : Activité qui renseigne sur la minéralisation du phosphore



Projet lauréat de l'appel à projet: PLAN
RÉGIONAL POUR LES PROTÉINES VÉGÉTALES
DESTINÉES À L'ALIMENTATION HUMAINE



Porteur du projet
UnilaSalle -Rouen



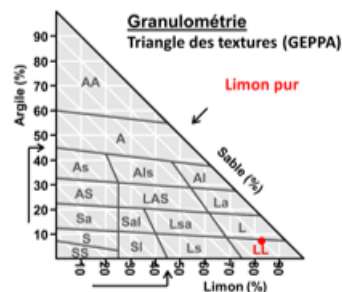
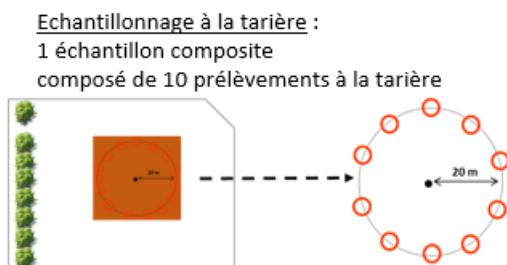
Partenaires



Pour en savoir plus: <https://www.unilasalle.fr/projet-de-recherche-proveg>

Analyses de terre

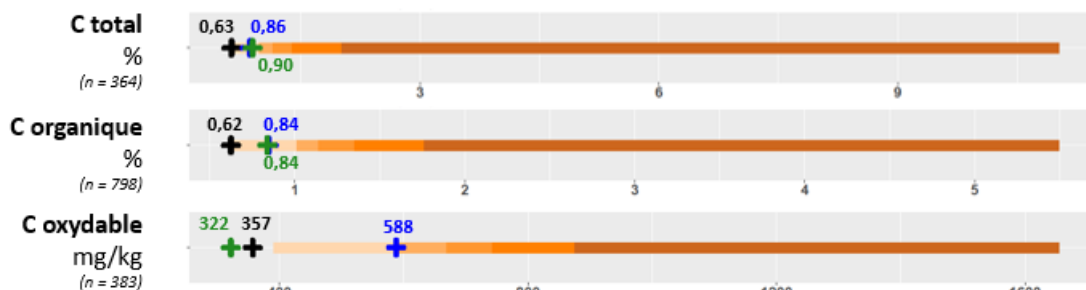
Exploitant agricole	Marius VOELTZEL	Code parcelle	A24	Coordonnées GPS parcelle	49,2 1,6	Culture	Quinoa	Dates prélèvement	05/05/2021 06/07/2021 19/10/2021	Profondeur prélèvement	0 – 20 cm
---------------------	-----------------	---------------	-----	--------------------------	-------------	---------	--------	-------------------	----------------------------------------	------------------------	-----------



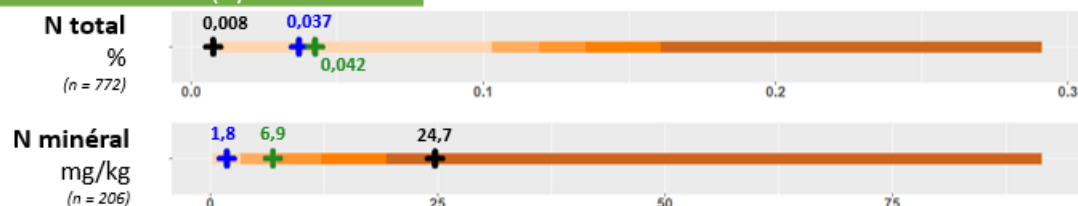
Indicateurs physico-chimiques



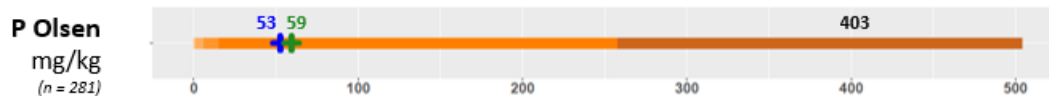
Carbone (C)



Azote (N)



Phosphore (P)

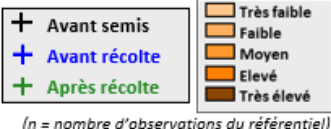


Analyses de terre

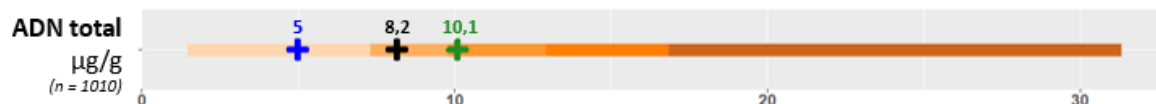
Exploitant agricole	Marius VOELTZEL	Code parcelle	A24	Coordonnées GPS parcelle	49,2 1,6	Culture	Quinoa	Dates prélèvement	05/05/2021 06/07/2021 19/10/2021	Profondeur prélèvement	0 – 20 cm
---------------------	-----------------	---------------	-----	--------------------------	----------	---------	--------	-------------------	----------------------------------------	------------------------	-----------

Indicateurs microbiologiques

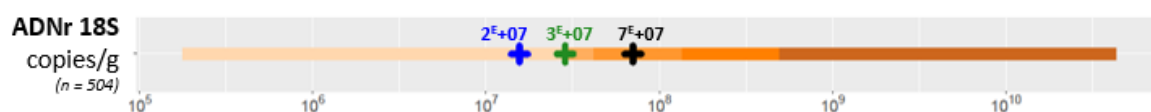
Abondance des microorganismes



Microorganismes totaux

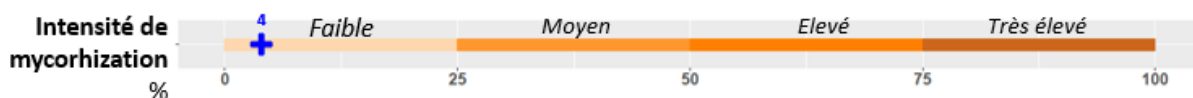


Champignons totaux

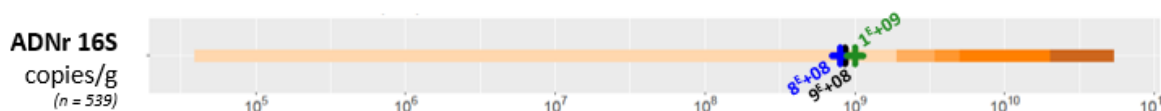


Champignons mycorhiziens

référentiel défini à dire d'expert



Bactéries totales

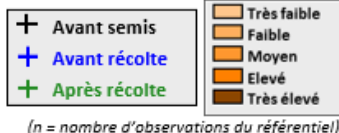


Analyses de terre

Exploitant agricole	Marius VOELTZEL	Code parcelle	A24	Coordonnées GPS parcelle	49,2 1,6	Culture	Quinoa	Dates prélèvement	05/05/2021 06/07/2021 19/10/2021	Profondeur prélèvement	0 – 20 cm
---------------------	-----------------	---------------	-----	--------------------------	-------------	---------	--------	-------------------	----------------------------------------	------------------------	-----------

Indicateurs microbiologiques

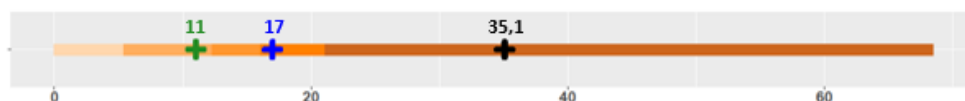
Activités enzymatiques de minéralisation C, N, P, S



Cycle C

β -glucosidase

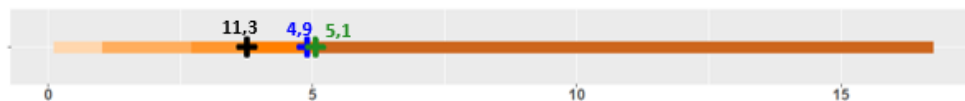
PNP/min/g
(n = 1018)



Cycle N

Arylamidase

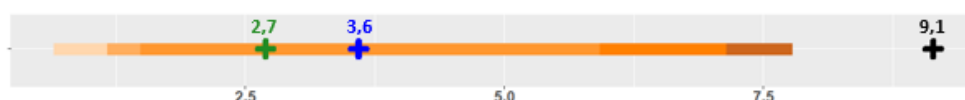
nmol β -NAPH/min/g
(n = 975)



Cycle S

Arylsulfatase

nmol PNG/min/g
(n = 56)



Cycle P

Phosphatase acide

nmol PNP/min/g
(n = 292)



Analyses de terre

Exploitant agricole	Marius VOELTZEL	Code parcelle	A24	Coordonnées GPS parcelle	49,2 1,6	Culture	Quinoa	Dates prélèvement	05/05/2021 06/07/2021 19/10/2021	Profondeur prélèvement	0 – 20 cm
---------------------	-----------------	---------------	-----	--------------------------	-------------	---------	--------	-------------------	----------------------------------------	------------------------	-----------

- Itinéraire technique sur 5 ans :

Culture en place	Couverts intermédiaires	Type destruction couverts	Biomasse couverts	Type d'effluents	Type de travail du sol	Fertilisation minérale	Valeur IFT total	Classe IFT total	Rendement	Classe rendement	Qualité récolte	Type de gestion des résidus
Année n (2020-2021)												
Quinoa	-	-	-	Fientes	Labeur	-	0	Nul	11,5 qte	Faible à moyen	Bonne qualité	Légers
Année n-1 (2019-2020)												
BB	-	-	-	Fientes	Labeur	Apport fertilisation minérale	0	Nul	73 qte	Moyen à élevé	Bonne qualité	Légers
Année n-2 (2018-2019)												
Pois chiche	-	-	-	-	Labeur	-	0	Nul	3,5 t	Moyen à élevé	Bonne qualité	Légers
Année n-3 (2017-2018)												
BB	-	-	-	-	Labeur	Apport fertilisation minérale	5,33	Élevé	905 qte	Très élevé	Bonne qualité	-
Année n-4 (2016-2017)												
Betterave	-	-	-	-	Labeur	Apport fertilisation minérale	3,78	Moyen	90 t	Très élevé	Bonne qualité	-

- Résultats des analyses physico-chimiques & microbiologiques du sol :
pH peu acide

	Avant semis	Avant récolte	Après récolte
Structure du sol			
MO / Argile	Non satisfaisant (15% < 17%)	Satisfaisant (20% > 17%)	Satisfaisant (20% > 17%)
Physico-chimie du sol			
Carbone			
C total	Très faible	Très faible	Très faible
C organique	Très faible	Très faible	Très faible
C oxydable	Très faible	Très faible	Très faible
Azote			
N total	Très faible	Très faible	Très faible
N minéral	Très élevé	Très faible	Faible
Phosphore			
P Olsen	Très élevé	Élevé	Élevé

	Avant semis	Avant récolte	Après récolte
Microbiologie du sol			
Abondances des microorganismes			
Microorganismes totaux			
ADN total	Faible	Très faible	Moyen
Champignons totaux & mycorhiziens			
ADNr 18S	Moyen	Très faible	Faible
Intensité de mycorhization	Faible	Faible	Faible
Glomaline	Très faible	Moyen	Très élevé
Bactéries totales			
ADNr 16S	Très faible	Très faible	Très faible
Activités des microorganismes			
β-glucosidase	Très élevée	Élevé	Faible
Arylamidase	Élevé	Élevé	Très élevé
Arylsulfatase	Très élevée	Faible	Faible
Phosphatase acide	Très élevée	Élevé	Élevé

Bilan

- Structure du sol**
La structure du sol est satisfaisante selon le ratio MO/Argile.
- Physico-chimie du sol**
Les indicateurs physico-chimiques sont globalement faibles hormis le phosphore disponible. Ce niveau élevé peut être dû à l'apport de fientes de poules.
- Microbiologie du sol**
L'abondance des bactéries et champignons totaux du sol est plutôt faible, elle peut être liée à la perturbation mécanique du labour. Néanmoins, les activités enzymatiques des cycles du C, S et P sont plutôt élevées au cours du cycle cultural du quinoa, comparativement à ce qui est retrouvé dans les sols normands. Ces résultats montrent une fourniture C N P S assez correcte. Mais les quantités faibles mesurées pourraient être liées à l'immobilisation de ces éléments par les microorganismes.
- Evaluation multicritère:** cf document joint