



HAL
open science

Évaluation multicritère de systèmes maraîchers basés sur la réduction du travail du sol associée à des apports de matière organique

Ivana Breton

► **To cite this version:**

Ivana Breton. Évaluation multicritère de systèmes maraîchers basés sur la réduction du travail du sol associée à des apports de matière organique. INRAE. 2023. hal-04238613

HAL Id: hal-04238613

<https://hal.inrae.fr/hal-04238613v1>

Submitted on 12 Oct 2023

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.

Évaluation multicritère de systèmes maraîchers basés sur la réduction du travail du sol associée à des apports de matière organique



Photos : Ivana Breton et Lorenzo Carré

Mémoire de Fin d'Études

Promotion 51 (2018-2023)

Date de la soutenance : 18/09/23

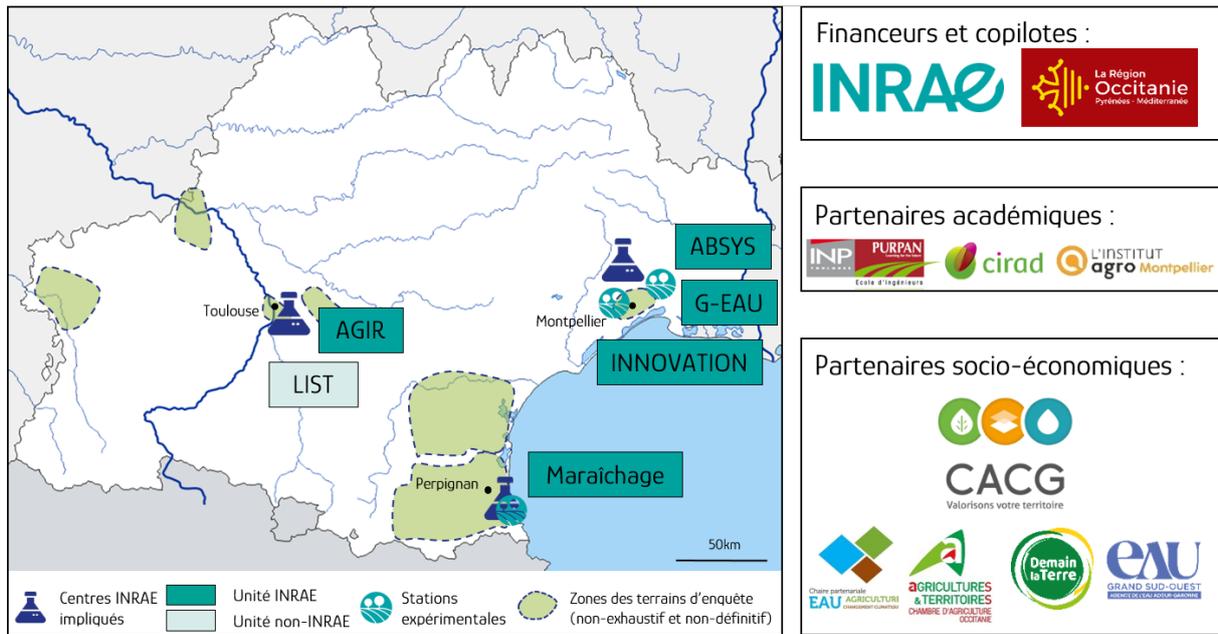
Tuteur Pédagogique :
Marion Peyric

Ivana Breton
Élève Ingénieur ISARA-Lyon

Directeur de mémoire :
Esther Guillot
Ingénieur Recherche INRAE

Ce document ayant été réalisé par des Élèves-Ingénieurs de l'ISARA dans le cadre d'une convention avec l'INRAE Unité Expérimentale Maraîchage d'Alénya, toute mention, communication ou diffusion devra faire état de l'origine Isara.

Le dispositif SMART-Sol est financé dans le cadre du projet PERKALISOL et du projet TETRAE TAI-Oc



Financiers et copilotes :

Partenaires académiques :

Partenaires socio-économiques :



Table des matières

Avant-propos.....	I
Remerciements.....	II
Glossaire	III
Table des abréviations :	IV
Table des figures et tableaux	V
Introduction	1
I. État des connaissances	3
1. La transition agroécologique pour répondre aux enjeux de demain.....	3
a. Notion générales – pourquoi l’agroécologie ?.....	3
b. Agroécologie : vers des agrosystèmes maraîchers sobres et efficaces	4
2. Le sol et l’eau, des ressources interdépendantes	5
a. L’eau dans le continuum sol-plante-atmosphère.....	5
b. L’eau dans le sol et sa dynamique	6
3. Les agroécosystèmes maraîchers et leurs pratiques.....	7
a. Le maraîchage : un système intensif pour les sols.....	7
b. Travail du sol et apports de MO : quels impacts sur le fonctionnement des sols ?	8
4. Maximiser les processus écologiques des sols au profit de leur santé	11
a. Qu’est-ce que la santé des sols ?	11
b. Évaluation de la santé des sols : indicateurs, méthodes.....	12
II. Matériels et Méthodes	15
1. Dispositif expérimental	15
a. Site expérimental.....	15
b. Présentation des différents systèmes	16
c. Mise en place de l’expérimentation	18
2. Méthodes de mesures : récolte des données pour la construction d’indicateurs.....	21
a. Méthode Biofunctool®	21
b. Des indicateurs de contexte pour Biofunctool : densité apparente et humidité.....	23
c. Observation d’endomycorhizes	24
d. Performance agronomique.....	24
e. Les capteurs : température, sondes hydriques.....	25
3. Traitements et analyses des données	26
a. Indicateurs.....	26
b. Traitements statistiques	27
c. Analyses des données	28

III.	Santé des sols : résultats et discussions.....	29
1.	Propriétés physico-chimiques des sols étudiés.....	29
2.	Impact du travail du sol sur les indicateurs de qualité des sols Biofunctool®	30
a.	Dynamique du carbone	30
b.	Recyclage des nutriments.....	33
c.	Maintien de la structure	34
d.	Indice de santé des sols	36
e.	Vers d'autres indicateurs de santé des sols, les endomycorhizes à arbuscules	40
IV.	Performance agronomique	42
1.	Reprise des plants, 20 jours après plantation	42
2.	Rendements de biomasse de fruits	43
V.	Efficience de l'irrigation	45
1.	Cumuls d'irrigation.....	45
2.	Efficience de l'eau	46
3.	L'eau dans le sol	47
VI.	Évaluation multicritère.....	49
VII.	Discussion générale	50
1.	Le dispositif expérimental présente certaines limites connues	50
2.	La comparaison de pratiques agricoles, une extrapolation limitée	51
3.	Un regard critique sur la méthode statistique utilisée.....	52
4.	Biofunctool® : quels retours d'expériences sur cette méthode ?	53
5.	Quelques pistes d'améliorations après une première campagne de mesures.....	54
6.	Quelques perspectives pour rendre ces données utilisables sur le terrain	56
VIII.	Réflexion Qualité de vie au travail	56
	Conclusion	57
	Bilan personnel	59
	Références Bibliographiques.....	
	Table des Annexes.....	

Avant-propos

Les noms d'indicateur (comme *Beerkan* ou *Situresp*) sont en italique dans le corps du texte. Les modalités sont toujours mentionnées suivant le gradient de réduction du travail du sol avec le code couleur suivant : T-Ref, T-NA, T-NA^{sup} et NT. La discussion des résultats est rédigée en violet.

Remerciements

Marion, merci pour nos échanges téléphoniques très intéressants sur la recherche, le maraîchage, l'agriculture mais aussi sur les parcours de vie et la musique. Merci pour votre grande disponibilité et pour la rigueur et l'exigence qui ont contribué à la qualité (je l'espère !) de ce mémoire.

Esther, merci de m'avoir montré, expliqué, accompagné, encouragée, soutenue et de m'avoir partagé tes connaissances sur le monde des sols. Merci pour les découvertes culinaires, les tisanes de verveine et les bons plans randos (et autres) me faisant visiter cette belle région. Tu m'as transmis ton émerveillement pour le Canigou.

Reconnaissante je suis d'avoir été bien accueillie par l'équipe d'Alénya. Merci à elle pour l'immersion dans la culture catalane et pour les moments partagés passés à chanter, jouer aux cartes et regarder la pleine lune se lever sur la plage. Un merci tout particulier à Laure pour ses conseils et son soutien : tu m'as partagé tes connaissances très riches sur le maraîchage. J'ai apprécié ta compagnie, ta gentillesse et ton énergie.

Colocataire hors pair : Louise ! Merci d'avoir rendu cette cohabitation si agréable à la *Villa des stagiaires* et pour tous les moments hors du temps passés à : discuter, cuisiner, rire, pédaler, se baigner, pique-niquer, jardiner et même (un peu) bricoler.

Immense merci à mes amis et ma famille, merci pour leurs encouragements, leur écoute et leurs visites dans le 66. Merci particulièrement à Marion, ma maman, et à ma tante Mel pour leurs relectures ayant contribué à améliorer la version finale de ce mémoire.

Et bien qu'il n'y ait plus assez de lettres dans MERCI :

Une pensée à toutes les belles rencontres que j'ai faites pendant ces 6 mois, sur Alénya et ses alentours et avec qui j'ai pu partager une danse, une randonnée, un cours de yoga ou un barbecue. De chouettes moments qui m'ont permis de me sentir bien entourée dans les Pyrénées Orientales et que je garderai en mémoire.

Merci aux sols et merci à la vie 

Glossaire

Agroécosystème : écosystème cultivé composé d'éléments biotiques et abiotiques qui interagissent entre eux et avec l'environnement d'une exploitation agricole. Un agroécosystème est « toujours intégré dans un environnement social, économique et écologique, et inscrit au sein de flux (d'énergie, de matière) et de mécanismes (cycles nutritifs, régulation des populations de ravageurs, transfert de pollen, etc.) » (Neyton *et al.*, 2018).

Assolement : répartition des cultures dans l'espace pour un cycle cultural donné (à l'échelle de l'exploitation).

Biomasse : masse totale ou partielle (ex : biomasse de fruits) d'un organisme vivant.

Bourgeon apical : bourgeon en bout de tige assurant sa croissance.

Coefficient cultural (K_c) : coefficient corrigeant l'évapotranspiration potentielle en intégrant les besoins en eau réels de la culture selon son stade de développement. Plus la culture est développée, plus ce coefficient se rapproche de 1. Il est récupéré pour chaque culture dans des tables et permet le calcul de la dose d'irrigation à apporter.

Conditions pédo-climatiques : ensemble des conditions de température, d'humidité et d'aération (CO_2 et O_2) dans les horizons du sol.

Érosion hydrique : déplacement des particules de sol d'un point A à un point B sous l'action de l'eau.

Évapotranspiration : somme de l'évaporation de la surface du sol et de l'eau transpirée par les plantes.

Évapotranspiration Potentielle : correspond à la quantité d'eau maximale en millimètre que le sol peut évaporer et les plantes, transpirer. Il s'agit d'une valeur théorique obtenue sur un sol couvert de façon homogène par un gazon et dont la réserve utile est pleine.

Pseudo-répliqua : Un répliqua statistique est la répétition d'une modalité afin d'évaluer la variabilité d'une mesure. On appelle pseudo-répliquas des répliquas dont la répétition n'est pas faite dans des contextes fondamentalement différents, ici la répétition est faite au sein d'un même tunnel. On s'attend alors à potentiellement évaluer moins de variabilité que dans le cas où chaque modalité aurait été répétée dans un tunnel, individu à part entière.

Ressuyage : évacuation de l'eau excédentaire présente dans les macroporosités du sol par évaporation de surface et drainage en profondeur (gravité).

Rotation : succession des cycles culturaux d'une parcelle dans le temps (à l'échelle de la parcelle). Exemple : Engrais Vert Seigle-Féverole – Poivron – Céleri – Concombre. A différencier de l'assolement.

Services écosystémiques : « biens et services que les Hommes peuvent tirer des écosystèmes, directement ou indirectement, pour assurer leur bien-être (nourriture, qualité de l'eau, paysages...) » (Sirami *et al.*, 2016).

Stade phénologique : stade de développement de la culture comme la germination, le développement des feuilles, la floraison...

Ver de terre anécique : Ver de terre de grosse taille ; ils vivent dans des galeries verticales et profondes qui font le lien entre la surface et la profondeur du profil de sol.

Les notions définies dans ce glossaire sont par un astérisque () marquées lors de leur première apparition dans le corps du mémoire.*

Table des abréviations :

ACP : Analyse des Composantes Principales

AMF : Endomycorhize à arbuscule, de l'anglais Arbuscular Mycorrhizal Fungi

ANOVA : Analyse de la variance, de l'anglais ANalysis Of VAriance

C : Carbone

c.à.d : c'est-à-dire

CEC : Capacité d'Échange Cationique

CT : Travail dit Conventionnel du Sol – correspond à un labour

DA : Densité Apparente

GLMM : Modèle mixte linéarisé, de l'anglais Generalized Linear Mixte Model

H_v : Humidité Volumique

INRAE : Institut National de Recherche pour l'Agriculture, l'alimentation et l'Environnement

ISARA : Institut Supérieur d'Agriculture Rhône Alpes

ETP : Évapotranspiration Potentielle

FAO : Organisation pour l'alimentation et l'agriculture, de l'anglais Food and Agriculture Organization

K_c : Coefficient cultural

MO : Matière Organique

MSV : Maraîchage sur Sol Vivant

N : Azote

N-P-K : Azote-Phosphore-Potassium, convention d'écriture composition proportionnelle engrais

NT : Modalité en Non-Travail du sol associé à des apports massifs de matière organique

NTS : Non Travail du Sol

pH : potentiel Hydrogène

PLA : Polyamide lactique

QVT : Qualité de Vie au Travail

SHI : Indice de santé des sols, de l'anglais Soil Health Index

TDR : Reflectomètre en domaine temporel, de l'anglais Time Domain Reflectometry

T.ha⁻¹ : Tonnes par hectare

T-NA : Modalité en Travail du sol Non-Animé associé à de faibles apports de matière organique

T-NAsup : Modalité en Travail du sol superficiel Non-Animé associé à des apports massifs de matière organique

T-ref : Modalité de Travail du sol de référence associé à de faibles apports de matière organique

UE : Unité Expérimentale

VESS : Évaluation visuelle de la structure, de l'anglais Visual Evaluation of Soil Structure

ZAD : Zone d'Acquisition de la Donnée

Table des figures et tableaux

Figure 1 – 10 éléments de l'agroécologie : pour l'évaluation de la transition des systèmes agricoles....	4
Figure 2 – Classification des opérations de travail du sol.....	9
Figure 3 – Diagramme ombrothermique de la station météo de l'unité expérimentale d'Alénia.....	15
Figure 4 – Historique des parcelles et modalité de l'étude.....	17
Figure 5 – Dispositif expérimental pour chaque tunnel sur la période printemps-été 2023	19
Figure 6 – Incubation Situresp	22
Figure 7 – Bait lamina après incubation in situ sur rangs de blettes.....	22
Figure 8 – Bandelettes-test, Tunnel non travaillé NT	23

Figure 9 – Test de sédimentation, tamis support pour l’immersion des agrégats	23
Figure 10 – Lame préparée de 25 fragments	24
Figure 11 – Indicateurs de l’évaluation multicritère.....	26
Figure 12 – Concentration en carbone labile des sols (mgC.kg ⁻¹ de sol) par modalité	30
Figure 13 – Respiration basale du sol mesurée par la différence d’absorbance selon les modalités....	31
Figure 14 – Résultats Situresp, les cuves initialement rouge-rose tendent vers du jaune-orange après incubation de 24h	31
Figure 15 – Dégradation de substrat carboné Bait lamina par modalité, fonction de la profondeur ...	32
Figure 16 – Concentration en nitrates (mgNO ₃ .kg ⁻¹ de sol) dans le sol par modalité.....	33
Figure 17 – Évaluation visuelle de la structure par modalité	34
Figure 18 – Stabilité des agrégats de surface (0-10cm) par modalité.....	35
Figure 19 – Stabilité des agrégats de profondeur (10-25 cm) par modalité	35
Figure 20 – Infiltration de l'eau dans le sol (mL.minute ⁻¹) par modalité	36
Figure 21 – Analyse des composantes principales des indicateurs Biofunctool®	37
Figure 22 – Matrice des corrélations ACP	38
Figure 23 – Indice de santé des sols (SHI) de la méthode Biofunctool® par modalités sur le premier cycle cultural du dispositif expérimental SMART-Sol, données mesurées en Mars 2023	39
Figure 24 – Fréquence de la mycorhization (%) par modalité.....	40
Figure 25 – Taux de mycorhization (%) par modalité	40
Figure 26 – Structures mycorhiziennes observées en T-NAsup	41
Figure 27 – Moyenne de rendement total par semaine (n=3) avec écart-type (histogramme) et cumuls de rendement par modalité (courbe)	43
Figure 28 – Irrigation et cumuls d'irrigation par modalité (intervalle de 4 jours)	45
Figure 29 – Efficience de l’irrigation par modalité	46
Figure 30 – Humidité volumique des sols après irrigation 17/05 mesurée à 10 cm de profondeur	47
Figure 31 – ACP des indicateurs santé des sols, agronomiques et hydriques (été 2023).....	49
Tableau 1 – Présentation des indicateurs Biofunctool®, des variables mesurées et des assemblages biologiques ciblés	13
Tableau 2 – Modalités expérimentales SMART-Sol Alénia	16
Tableau 3 – Apports engrais en début de culture de concombres, avril 2023.....	20
Tableau 4 – Densité apparente et Humidité du sol mesurées en mars 2023.....	29
Tableau 5 – Résultats des indicateurs de reprise par modalité et résultats de l'ANOVA	42

Introduction

La recherche expérimentale en agriculture a pour objectif de questionner les pratiques d'hier et d'aujourd'hui et de comprendre celles qui permettront, demain, de produire des denrées alimentaires en limitant les impacts sur l'environnement. L'enjeu est de se préparer aux changements auxquels fait face l'agriculture qu'ils soient sociétaux, politiques, climatiques ou environnementaux.

Aujourd'hui, avec les sécheresses que l'on traverse, les systèmes agricoles d'Occitanie sont questionnés. L'aridité rend difficile la production, qui est alors majoritairement dépendante de l'irrigation. La ressource en eau, dans le même temps, se raréfie. Cela induit des périodes de tension et de restriction de son usage pour l'irrigation. Les systèmes maraîchers, systèmes emblématiques d'Occitanie avec les systèmes viticoles et de grandes cultures, sont très dépendants des éléments climatiques et de la ressource en eau, et pleinement touchés par la raréfaction de cette ressource. Par conséquent, l'étude des liens (complémentarités et antagonismes) entre pratiques agroécologiques et irrigation est nécessaire afin d'assurer la résilience des exploitations agricoles, de produire des aliments et des régimes alimentaires sains, diversifiés et durables et ce, à l'échelle d'un bassin alimentaire local occitan (Aguilera *et al.*, 2020).

Pour mieux comprendre les enjeux liés à l'eau, le sol doit aussi être étudié : ces deux éléments sont indissociables puisque le sol interagit sur la composante eau et vice et versa. Le sol évolue sous l'action de l'eau ce qui implique « une transformation rétroactive de ses propriétés qui modifient de façon dynamique la circulation de l'eau » (Perales *et al.*, 2008). Le sol est aussi une ressource à protéger pour assurer la production agricole de demain.

Des interrogations émergent alors autour des pratiques culturales : quelles pratiques agricoles permettent de préserver ces deux ressources ? Comment avoir un sol en bonne santé tout en assurant une production suffisante ? Quelles propriétés du sol permettent une optimisation de la disponibilité et du stockage de l'eau ? L'objectif est d'identifier des systèmes moins consommateurs en eau, performants et efficaces qui favorisent le fonctionnement chimique, physique et biologique des sols.

Dans ce contexte, un dispositif appelé SMART-Sol a été initié sur l'unité expérimentale (UE) d'Alénia, entité de l'Institut National de Recherche pour l'Agriculture, l'Alimentation et l'Environnement (INRAE) spécialisée en maraîchage biologique sous abris. Le dispositif SMART-Sol est financé par deux projets : TAI-Oc pour Transition Agroécologique et Irrigation Occitanie et Perkalisol. Le projet TAI-Oc s'intéresse principalement aux questions de la préservation de la ressource en eau et finance le suivi hydrique sur le dispositif SMART-Sol. Il a pour objectifs de caractériser les systèmes agroécologiques irrigués d'Occitanie, de comprendre les facteurs de la transition agroécologique de ces systèmes et

d'accompagner cette transition auprès des agriculteurs et des acteurs du territoire. Ce projet s'étale sur 5 ans et inclut l'étude des trois systèmes emblématiques d'Occitanie. Le projet Perkalisol s'intéresse, quant à lui, à l'impact de pratiques agroécologiques sur les sols et finance les mesures d'évaluation de la santé des sols.

Le dispositif SMART-Sol démarre avec un premier cycle de culture cet été 2023. Il devrait être maintenu sur du long terme au sein de l'UE Maraîchage. Il vise à identifier et comprendre l'impact de certaines pratiques agroécologiques sur le fonctionnement de l'agroécosystème en sols limoneux. Ces pratiques sont différents degrés de réduction de travail du sol associés à des apports de matière organique plus ou moins importants. Le stage de fin d'étude est réalisé dans le cadre du premier suivi de cycle cultural du dispositif, avec des mises au point de méthodologie et les premières mesures.

Ce mémoire se découpe en plusieurs parties. Dans un premier temps, l'état des connaissances permet de définir l'agroécologie, de mieux connaître les systèmes maraîchers et leurs contraintes, de comprendre les relations entre l'eau et le sol, ainsi que les impacts du travail du sol et d'introduire le concept de santé des sols. A la fin de l'état des connaissances, la problématisation et les hypothèses de recherche sont formulées. Puis, le dispositif expérimental avec le matériel et les méthodes utilisés sont décrits. Les résultats obtenus lors du premier cycle cultural du dispositif SMART-Sol sont ensuite présentés avec 3 parties : l'évaluation de la santé des sols, la performance agronomique des systèmes étudiés et l'efficacité de l'irrigation. Des résultats plus globaux sont présentés à travers une évaluation multicritère. Une discussion générale permet de souligner les limites de la présente étude et les perspectives associées. Enfin, une réflexion sur la qualité de vie au travail au sein de l'UE d'Alénia est proposée.

I. État des connaissances

1. La transition agroécologique pour répondre aux enjeux de demain

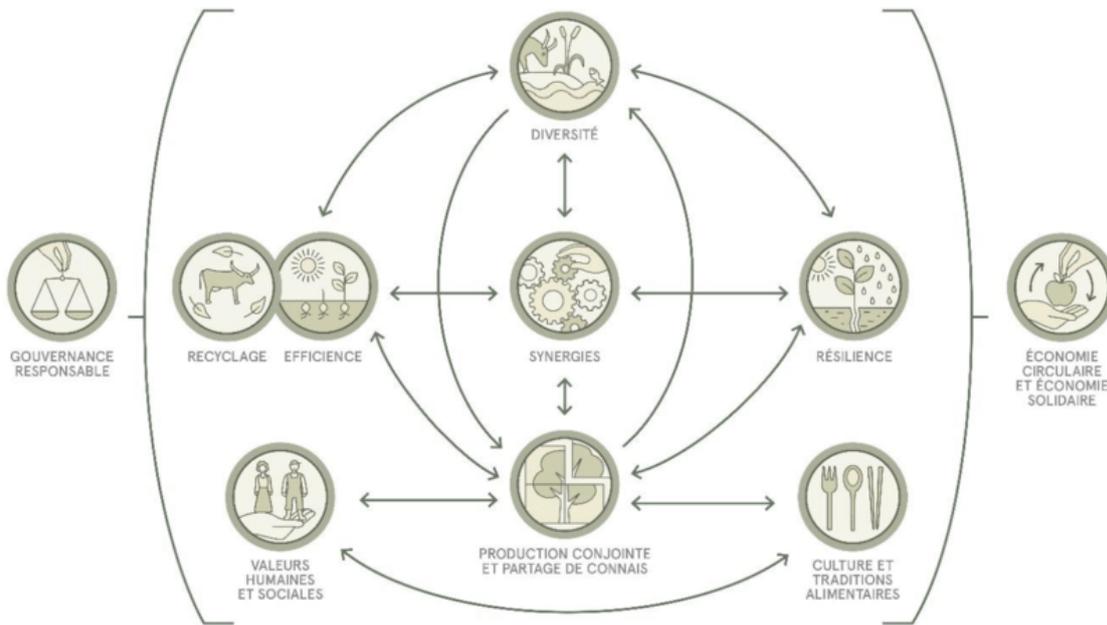
a. Notion générales – pourquoi l'agroécologie ?

Face à la complexité et la multiplicité des challenges auxquels font face nos agricultures et nos systèmes alimentaires, des changements et des transitions sont entamés pour aller vers plus de durabilité. La dégradation des sols, l'érosion de la biodiversité, les pollutions de l'eau, de l'air, des sols, la surconsommation des ressources naturelles, le changement climatique, la perturbation des cycles des nutriments (Aguilera *et al.*, 2020; Laurent, 2012; Rainelli, 1996) mais aussi les enjeux sociaux de dépendance aux énergies fossiles, de disparition des petites fermes familiales, de malnutrition et de santé (Mendez *et al.*, 2015) sont autant de problématiques à prendre en compte dans la conception des systèmes agricoles de demain. En zone méditerranéenne, les effets du changement climatique – augmentation de la température, diminution des précipitations (Saadi *et al.*, 2015) associées à des événements extrêmes plus fréquents et à des risques importants de sécheresse – auront des impacts forts sur la production agricole : cette région est particulièrement vulnérable (Aguilera *et al.*, 2020). Les projections climatiques permettant d'affiner les connaissances, il semble clair que l'adaptation des systèmes est primordiale (Iglesias *et al.*, 2010). L'approche agroécologique tente de répondre à ces problèmes agro-environnementaux et sociaux de façon globale, en considérant chaque contexte avec ses contraintes propres (Aguilera *et al.*, 2020; Barrios *et al.*, 2020).

Depuis 1990, une croissance exponentielle de travaux scientifiques relatifs à l'agroécologie s'observe. Internationalement, l'agroécologie est vue par les scientifiques comme une science de la durabilité des systèmes agro-alimentaires (Magrini *et al.*, 2023). Il s'agit d'une approche multidisciplinaire au croisement des sciences agronomiques, de l'écologie appliquée aux agroécosystèmes* et des sciences humaines et sociales (David *et al.*, 2011). Wezel *et al.*, 2009 soulignent l'ambiguïté de l'emploi du terme agroécologie. Ce dernier représente à la fois une science, un mouvement et/ou des pratiques et ce, à différentes échelles. Dans tous les cas, l'agroécologie permet un questionnement du système alimentaire dans sa globalité et met en avant des systèmes viables respectueux des hommes et de leur environnement comme une alternative à une agriculture intensive. Elle promeut « des systèmes de production agricole valorisant la diversité biologique et les processus naturels » (Hazard *et al.*, 2016) comme le bouclage des cycles (nutriments et énergie), la vie du sol et la biodiversité (Nyéléni, 2015).

Il n'y a pas de définition unique ni de modèle-type d'une agroécologie applicable partout. L'organisation pour l'alimentation et l'agriculture (FAO en anglais) propose un outil de réflexion et d'évaluation construit autour de 10 éléments de l'agroécologie interconnectés et interdépendants (Figure 1). Ces éléments permettent d'avoir une approche holistique des systèmes alimentaires (Barrios *et al.*, 2020).

Figure 1 – 10 éléments de l'agroécologie : pour l'évaluation de la transition des systèmes agricoles, Barrios et al., 2020



Aguilera *et al.*, 2020 soulignent l'importance d'augmenter les taux de matière organique (MO) dans le sol et de mettre en place une stratégie de gestion de la biodiversité afin de limiter les risques auxquels peuvent faire face les agroécosystèmes. Pour eux, la volonté de l'agroécologie est aussi de reconnecter les systèmes alimentaires avec les consommateurs et de retrouver des habitudes alimentaires adaptées localement – comme le régime Méditerranéen largement végétal (Aguilera *et al.*, 2020).

L'agroécologie est ainsi considérée comme un levier important pour les agroécosystèmes de demain que l'on parle de systèmes viticoles, d'élevage, de grandes cultures, ou encore de maraîchage.

b. Agroécologie : vers des agrosystèmes maraîchers sobres et efficaces

Le maraîchage représente en France moins de 1% de la surface agricole utile totale. En 2020, le recensement agricole montre une croissance de ce secteur (Caraes, Vauthier, 2022). Les systèmes maraîchers existent sous une diversité de formes avec des contraintes variant selon l'orientation commerciale de l'exploitation (circuits courts ou longs), le degré de diversification, l'inscription à un cahier des charges (Agriculture Biologique), les ressources disponibles (Navarrete *et al.*, 2017).

Aujourd'hui, 60% des surfaces maraîchères totales sont irriguées (INRAE, 2023). L'irrigation en goutte à goutte permet une réduction de 20 à 35% de la consommation en eau pour la culture en plein champ. La mise en place de pratiques « visant à capter et conserver au maximum l'eau dans les sols » comme le paillage, les apports de MO, la limitation du travail du sol et la diversification des cultures (INRAE, 2023) est un levier pour tendre vers une agriculture plus efficace dans l'usage de cette ressource.

La conduite sous abris est largement déployée afin de gagner en précocité de production et de protéger les cultures contre des aléas environnementaux. Cette conduite est dite artificialisée avec peu de

transfert avec l'extérieur de par les bâches plastiques, des rotations rapides et une absence de jachère (Navarrete *et al.*, 2017). Pour autant, la transition agroécologique a déjà commencé dans ces systèmes : une diversité de pratiques agroécologiques se décline pour répondre à leurs propres problématiques. Les maraîchers expérimentent eux-mêmes pour trouver les pratiques les plus adaptées à leurs systèmes, leurs conditions pédo-climatiques* et leurs contraintes (Catalogna *et al.*, 2018). Ces pratiques sont mises en place pour des raisons économiques mais aussi pour des motivations personnelles : des motivations sociales avec par exemple la réduction du temps de travail et/ou environnementales avec une utilisation plus durable des ressources (Morel, Léger, 2016).

A l'échelle de l'exploitation maraîchère, l'agroécologie peut se traduire par certaines pratiques comme la mise en place d'une rotation diversifiée, l'implantation de couverts végétaux, la réduction du travail du sol (Catalogna *et al.*, 2018) et la couverture du sol. La protection des cultures passe par la mise en place de la lutte biologique, de plantes pièges ou hôtes d'insectes auxiliaires dans les tunnels, de bandes fleuries et par la diversification à l'échelle de la parcelle (Lefèvre *et al.*, 2020). L'agroécologie questionne le système alimentaire dans son ensemble : les fermes maraîchères agroécologiques ne peuvent donc pas être considérées comme des systèmes indépendants et doivent s'ancrer dans le système alimentaire territorial (Fernandez *et al.*, 2012).

2. Le sol et l'eau, des ressources interdépendantes

a. L'eau dans le continuum sol-plante-atmosphère

L'eau est indispensable à la croissance des végétaux. C'est un constituant essentiel qui permet le transport des éléments minéraux (sève brute), nutritifs (sève élaborée) et la régulation de la température par transpiration mais qui est aussi essentielle à la photosynthèse (Bouthier *et al.*, 2022).

L'eau circule dans le sol puis passe dans le système racinaire et la plante pour atteindre ensuite l'atmosphère. On parle de continuum sol-plante-atmosphère pour désigner ces trois compartiments qui communiquent entre eux (Granier, 2019). Les flux d'eau se font sans dépense d'énergie, en suivant les différences de potentiel hydrique Ψ entre le sol, la plante et l'atmosphère. Le potentiel hydrique, exprimé en unité de pression, retranscrit « la force avec laquelle l'eau est retenue » dans un compartiment : plus la liaison de l'eau au compartiment est forte, plus le potentiel hydrique s'exprime négativement (Delalande *et al.*, 2017; Bouthier *et al.*, 2022). Aussi, plus un sol est sec, plus son potentiel hydrique est négatif (Delalande *et al.*, 2017).

Le potentiel hydrique de l'atmosphère est dépendant de la météo (température, humidité, vent), on parle de demande climatique. Elle est aussi appelé évapotranspiration* et se mesure en millimètres (Bouthier *et al.*, 2022). Le potentiel hydrique du sol dépend de la quantité d'eau dans le sol, et donc de la pluviométrie, de l'irrigation et de la capacité de rétention d'eau du sol (cf 2.b).

b. L'eau dans le sol et sa dynamique

Dans le sol, l'eau est plus ou moins disponible pour les plantes en fonction de la nature du sol (texture, porosité, pierrosité), de sa profondeur et de la quantité d'eau présente (Delaunois, 2014; Bouthier *et al.*, 2022).

Le réservoir utilisable représente la quantité d'eau que peut stocker un sol pour les plantes : il est délimité par la valeur de capacité au champ soit l'humidité maximale d'un sol après ressuyage* et par la valeur seuil de point de flétrissement permanent, seuil en dessous duquel la plante n'est plus en capacité d'absorber l'eau (Bouthier *et al.*, 2022). Ces seuils sont dépendants des cultures. Pour la majorité des cultures, le point de flétrissement permanent correspond à un potentiel hydrique Ψ d'environ - 15 bars (Delalande *et al.*, 2017). A titre de comparaison, en condition de confort hydrique à la capacité au champ, le potentiel hydrique est d'environ - 1 bar (Bouthier *et al.*, 2022). Parce qu'une plante peut utiliser seulement l'eau présente à proximité de ses racines, la notion de réservoir facilement utilisable approxime le réservoir utilisable, elle correspond à 50 à 70% du réservoir utilisable en fonction des sols (Bouthier *et al.*, 2022). Ce réservoir est difficilement mesurable. Il varie au cours du temps en fonction notamment des pratiques agricoles et est souvent approximé par des bilans hydriques (Chambre d'agriculture du Gers, 2017).

La consommation d'eau des plantes est calculée en fonction de l'évapotranspiration potentielle (ETP), de la culture et de son stade phénologique*. Des coefficients culturaux* (K_c) ont été déterminés par des expérimentations agronomiques pour de nombreuses cultures (maraîchage, arboriculture et grandes cultures) en fonction de leur stade de développement (Bouthier *et al.*, 2022). La formule détermine les besoins en eau d'une culture. Sous abris dans les tunnels maraîchers, ces besoins correspondent globalement aux besoins d'irrigation de la culture (Crestin, Boyer, 2009). L'ETP sous abris est d'environ 80% de l'ETP mesurée en station météorologique (Martinez *et al.*, 2012).

Le cycle de l'eau permet de comprendre le rôle des sols et le lien étroit existant entre ces deux ressources. L'eau des précipitations s'infiltré en partie dans le sol. Cette infiltration est primordiale pour limiter les inondations et réguler les crues (Montoroi, 2012). La vitesse d'infiltration dépend fortement de la présence de porosité dans les horizons de surface du sol (Bruand, Coquet, 2005) mais aussi de la texture et de la couverture du sol (Shipitalo *et al.*, 2000; Montoroi, 2012). L'eau qui s'infiltré est à nouveau régulée par les sols : soit elle rejoint les nappes d'eau souterraines, soit elle est mobilisée par les végétaux et retourne à l'atmosphère (continuum sol-plante-atmosphère). Cette régulation donne une fonction de « Réservoir d'eau » aux sols (Dörfliger, Gascuel, 2018; Montoroi, 2012). Là encore, cela dépend de la nature du sol et plus particulièrement de la taille des pores du sol : la microporosité permet de retenir d'avantage l'eau (Bruand, Coquet, 2005).

Dans le profil de sol, l'eau circule aussi par capillarité et diffusion latérale (Martinez *et al.*, 2012). C'est ce qui rend complexe l'évaluation du réservoir utilisable dans son intégralité.

L'eau qui ne s'infiltré pas ruisselle en surface. Cela expose le sol à des risques d'érosion hydrique*. L'eau peut aussi modifier la structure du sol mécaniquement lors de sa chute. Le contact de la goutte d'eau avec le sol entraîne une réorganisation des particules : on parle d'effet « splash » (Montoroi, 2012). L'effet « splash » représente particulièrement un risque sur des sols limoneux. Ces deux phénomènes – ruissellement et effet « splash » – s'observent d'autant plus lorsque les sols ne sont pas couverts (Alletto *et al.*, 2021).

La circulation de l'eau dans le sol et la qualité de l'eau sont à mettre en lien avec les pratiques agricoles. La partie suivante présente l'impact du travail du sol et de l'apport de MO sur l'eau et le sol. Cela touche à la fois à la performance des systèmes agricoles et à l'organisation territoriale et sociétale.

3. Les agroécosystèmes maraîchers et leurs pratiques

a. Le maraîchage : un système intensif pour les sols

Les systèmes maraîchers ont un usage intensif des sols (Norris, Congreves, 2018) : les cycles des cultures sont courts ce qui permet d'enchaîner deux à trois cultures par an sur une même parcelle. Les exportations de biomasse* végétale, et ainsi d'éléments minéraux, sont très importants avec peu de restitution au sol (Lecompte, Goillon, 2015). De ce fait, les taux de matière organique (MO) de ces systèmes sont relativement faibles (Imaz *et al.*, 2010). Des apports de fertilisants minéraux ou organiques sont donc nécessaires pour accompagner les besoins de la culture. Des apports de MO peuvent aussi être réalisés tout particulièrement dans les systèmes en agriculture biologique (GRAB, 2010). La forme des apports est multiple : fumures animales, compost, broyats de végétaux, implantation d'engrais verts. La diversification est variable en fonction des systèmes ; les systèmes diversifiant peu les apports sont d'autant plus intensifs pour les sols et impactent leur vie biologique.

Les systèmes maraîchers sont historiquement particulièrement travaillés : l'objectif a longtemps été d'obtenir une terre très fine. A partir des années 1930, avec la mécanisation des systèmes agricoles, les sols maraîchers sont intensément travaillés pour « casser [les mottes de terre] en miettes et obtenir des agrégats de quelques millimètres de diamètre, taille d'agrégats définie par le passé comme la plus favorable à la croissance des plantes » (Gradwell, Arlidge, 1971). Pourtant, dès 1960, de grandes régions maraîchères de Nouvelle-Zélande alertent sur la baisse de rendement, la perte de stabilité structurale, la chute des taux de MO et la compaction des sols travaillés intensément sur une période de 30 ans – comparaison avec des parcelles conduites en rotation « production maraîchère-prairie » (Gradwell, Arlidge, 1971). En 2001, Chevallier *et al.* soulignent les mêmes limites sur des systèmes maraîchers en place depuis 15 ans en Martinique, y ajoutant l'augmentation des risques d'érosion.

En maraîchage biologique, l'entretien du sol aussi bien au niveau de sa structure que de son taux de MO est un pilier essentiel à la réussite des cultures (GRAB, 2010). La fertilisation ne peut se faire qu'en début de culture. En effet, les engrais solubles utilisés en conventionnel ne peuvent pas être utilisés en agriculture biologique et l'application de fertilisation sous forme de poudre est difficile, notamment en cas de paillage (Mazollier, 2001). Ainsi, la bonne alimentation minérale des cultures repose grandement sur le sol et sa capacité à stocker puis relâcher les éléments nutritifs nécessaires.

De nouvelles pratiques émergent : Maraîchage sur Sol Vivant (MSV), maraîchage bio-intensif mis en avant par Jean-Martin Fortier (Muñoz, 2021), permaculture, maraîchage biologique diversifié sur petites surfaces et microferme maraîchère. Ces « courants » sont plus ou moins strictement définis. Ils s'inspirent les uns les autres et se ressemblent : pas ou peu de travail du sol, apports de MO, couverture permanente du sol, forte diversification de la production et commercialisation en circuits-courts avec plusieurs types de débouchés. En MSV, les apports de MO sont parfois massifs. Cela peut correspondre à des apports : annuels de 120 T.ha⁻¹ (Maraîchage Sol Vivant, 2017), tous les 2-3 ans de 150-200 T.ha⁻¹ (Bouvier, 2019), en une fois de 230 T.ha⁻¹ (Maraîchage Sol Vivant, 2021). Usuellement, les apports en systèmes maraîchers sont de 30 T.ha⁻¹ tous les 2 ans.

b. Travail du sol et apports de MO : quels impacts sur le fonctionnement des sols ?

Le Non-Travail du Sol (NTS) est davantage étudié en recherche sur les systèmes de grandes cultures. Un focus de l'impact du NTS sur les sols limoneux est proposé ici, sols étudiés par la suite. Souvent associé à des apports de MO, l'effet de ceux-ci sera aussi souligné.

Les études concordent à dire que les effets du travail du sol sont fortement dépendants des conditions de la réalisation de celui-ci (humidité du sol au moment du passage de l'outil par exemple) et des propriétés du sol (Unger, Cassel, 1991). De façon globale, travailler le sol impacte directement certaines de ses propriétés, les cycles biogéochimiques de l'azote et du carbone et le fonctionnement biologique du sol. Par un effet cascade, d'autres processus du sol sont affectés. Le travail du sol existe dans une diversité de formes et d'outils, avec des différences d'action (retournement du profil de sol, fragmentation, enfouissement, mélange), de profondeur, de vitesse de passage et de zone travaillée. La figure 2 classe les différentes opérations de travail du sol.

Le NTS impacte la structure du sol, c.à.d. la disposition des particules de sols entre elles. L'un des risques mis en avant avec l'arrêt du labour est la perte de porosité et la difficulté des racines à se développer en sol tassé (Soane *et al.*, 2012; Imaz *et al.*, 2010). En effet, la densité apparente des sols augmente souvent à la suite de l'arrêt du travail du sol (Azooz, Arshad, 1996; Álvaro-Fuentes *et al.*, 2008; Soane *et al.*, 2012). Cependant, il est montré sur le long terme (15 ans pour l'étude d'Azooz et Arshad) que le NTS permet de conserver une cohésion structurale, d'augmenter la micro-porosité et

d'avoir une continuité entre les pores du sol (Azooz, Arshad, 1996; Boizard *et al.*, 2014). La connectivité entre les pores du sol témoigne de la qualité de la porosité (Azooz, Arshad, 1996).

Figure 2 – Classification des opérations de travail du sol, Roger-Estrade *et al.*, 2014

		Profondeur	Pas de travail	Semis : 3 cm, reste: 0 cm	Fragmentation + Retournement + Enfouissement	Mélange + Enfouissement		Pas de mélange et un minimum d'enfouissement	
						Fragmentation sans retournement			
Profondeur	Spérifical	3-15 cm		Labour très superficiel (≤ 15 cm) Déchaumeur à versoirs	Travail superficiel Dents, disques, chisel, herse, houes, cultivateur, canadien, vibroculteurs	Travail superficiel en bandes Strip tillers Rotasemis			Semis direct (sous couvert)
	Profond	15-40 cm		Labour +/- profond Charrue à versoirs (+rasette)	Pseudo-labour machines à bêchet, charrue à disques, cultivateurs lourds (chisel), pulvérisateurs lourds (disques), charrue Express			Décompactage lames, dents	
	Très profond	40-80 cm		Labour très profond, défoncement Charrue « robuste »				Sous-solage dents (+ abus)	
					100%	100%	Bandes 30%	100%	Ligne de semis 5%
					Zone travaillée (%)				

Fragmentation sans retournement = TCS

Les différences de macroporosité entre sols labourés et non travaillés semblent relativement faibles (Azooz, Arshad, 1996; Boizard *et al.*, 2014). So *et al.* suggèrent toutefois en 2009 que la macroporosité de surface est plus importante en NTS. Cela s'explique par la présence de résidus de culture et de MO dans les horizons de surface, absents dans les systèmes travaillés. Sans fragmentation par un travail du sol, la porosité est maintenue par les effets du climat (gel-dégel), biologiques (racines, pédofaune) et les processus d'agrégation des particules de sol (Boizard *et al.*, 2014). Ces processus étant lents, la stabilité structurale des sols non labourés s'évalue à long terme. En cas de tassements importants (passage d'engin lourd), la restructuration des sols est très longue en NTS (Boizard *et al.*, 2014).

L'arrêt du labour et le NTS permettent par conséquent de maximiser les bénéfices des propriétés hydriques : la teneur en eau et la capacité de rétention de l'eau dans le sol sont supérieures dans des systèmes pas ou peu travaillés, spécifiquement en sols limoneux (Mahboubi *et al.*, 1993; Azooz, Arshad, 1996; Soane *et al.*, 2012). A long terme, l'évolution des propriétés structurales du sol permet une bonne conductivité hydraulique (circulation de l'eau dans le sol) et des taux d'infiltration plus élevés en NTS. Cela est particulièrement observable les années sèches (Azooz, Arshad, 1996; Soane *et al.*, 2012).

La diminution de l'intensité de travail du sol influence les cycles des nutriments, notamment du carbone (C) et de l'azote (Mary *et al.*, 2014).

L'arrêt du travail du sol entraîne une verticalisation de la distribution du C organique le long du profil de sol : la concentration en C organique est supérieure sur les 10 à 15 premiers centimètres en NTS par rapport à un travail dit conventionnel (CT ; Álvaro-Fuentes *et al.*, 2008; Franzluebbers, 2002). En profondeur, cette concentration diminue fortement pour les systèmes non travaillés (Franzluebbers, 2002) et les taux de MO sont plus bas qu'en CT (Mary *et al.*, 2014; Álvaro-Fuentes *et al.*, 2008). Cela souligne alors que la seule pratique du NTS ne permet pas d'augmenter le stockage du carbone dans le sol. Le gradient de C le long du profil de sol s'explique par la concentration des MO en surface dans les systèmes sans enfouissement des résidus de culture (Mary *et al.*, 2014). Des différences s'observent entre les types de travail du sol : les systèmes travaillés avec des outils non animés (sans prise de force) ont une concentration en C organique totale plus importante qu'en CT (Álvaro-Fuentes *et al.*, 2008). Les mêmes tendances s'observent sur les matières organiques particulières, c.à.d. les déchets organiques de petite taille tels les fines racines, facilement accessibles pour les organismes du sol et dont les concentrations sont sensibles aux pratiques agricoles (Álvaro-Fuentes *et al.*, 2008).

Comme pour le C, la teneur en azote (N) est répartie en un gradient vertical dans les systèmes en NTS (Mary *et al.*, 2014). En revanche, les études étudiant le stock de N, les flux de nitrates et d'ammonium ne présentent pas de consensus quant à l'évolution de la disponibilité de N pour la culture avec la réduction du travail du sol. Le cycle de N semble dépendant du type de résidus de culture et d'autres pratiques – implantation de couverts à forte biomasse, apport d'amendement... (Mary *et al.*, 2014).

Les apports de MO impactent les cycles du C et de N. Une étude factorielle s'intéressant aux systèmes maraîchers souligne que, dans ces systèmes aux exportations végétales massives, l'apport de MO par des apports de compost (deux apports par an de 9 T.ha⁻¹) et l'implantation d'engrais verts a plus d'impact sur les sols que la pratique de travail du sol (Jackson *et al.*, 2004). Les concentrations totales de C et N sont supérieures pour les modalités avec des apports de MO. Pour la concentration en nitrates dans le sol, c.à.d. la fraction de N minéralisé, un effet couplé du travail du sol et de l'apport de MO est montré : la concentration la plus faible en nitrates s'observe dans les sols en travail réduit quand ils sont associés à des apports de MO (Jackson *et al.*, 2004).

En modifiant les propriétés physiques des sols et la répartition des éléments nutritifs, la réduction du travail du sol impacte également les communautés biologiques (Bouthier *et al.*, 2014; Vian, 2009). La diversité de ces communautés contribue au fonctionnement des sols. On parle de services écosystémiques* pour désigner les services rendus par les organismes du sol (Bouthier *et al.*, 2014) en exprimant leur comportement naturel et dont l'Homme peut tirer parti.

Les communautés microbiennes suivent l'enfouissement des résidus de culture, elles sont donc fortement présentes en surface du profil de sol pour les systèmes en NTS avec une stratification

verticale (Vian, 2009; Bouthier *et al.*, 2014). Une modification de la structure et de la composition des communautés microbiennes s'effectue avec l'arrêt du travail du sol. Certaines études mettent en avant le développement plus important de la biomasse fongique dans ces systèmes, favorisée par l'absence de perturbations mécaniques et l'augmentation de l'humidité (Bouthier *et al.*, 2014). Cela ne fait toutefois pas consensus dans la littérature scientifique (Vian, 2009). Au niveau des endomycorhizes à arbuscules (AMF), une modification des souches présentes s'observe aussi en fonction du travail du sol (Mirás-Avalos *et al.*, 2011). En sol argileux, il a aussi été montré une plus forte abondance d'AMF en NTS par rapport à un système en CT (Såle *et al.*, 2015). Enfin, en CT, les espèces bactériennes opportunistes sont très présentes (Bouthier *et al.*, 2014). Les communautés bactériennes en CT diffèrent de celles présente pour un travail du sol non animé (Vian, 2009).

Les effets sur la mésofaune sont multiples et difficiles à évaluer : les espèces sont nombreuses et trop peu étudiées. Il semble que la mésofaune soit impactée par d'autres pratiques que le travail du sol comme les apports de MO, les choix de rotation et l'implantation de couverts végétaux (Bouthier *et al.*, 2014). La macrofaune est en général affectée par les perturbations mécaniques (Bouthier *et al.*, 2014). Les populations de vers de terre sont favorisées par le NTS (Azooz, Arshad, 1996; Peigné *et al.*, 2007), surtout lorsqu'il est associé à des apports de MO (Peigné *et al.*, 2007). Les vers de terre anéciques* sont particulièrement sensibles au labour (Bouthier *et al.*, 2014).

4. Maximiser les processus écologiques des sols au profit de leur santé

a. Qu'est-ce que la santé des sols ?

Les sols fournissent de nombreux services écosystémiques : ils permettent notamment la production d'aliments, de fibres et de combustibles mais aussi le bouclage des cycles d'éléments nutritifs, la régulation du climat et des crues, la purification de l'eau et la réduction des contaminants du sols (FAO, 2015). Ils jouent un rôle pour la santé humaine (Lehmann *et al.*, 2020). Afin d'améliorer certains services du sol, il est nécessaire d'avoir une approche globale et multifonctionnelle.

La santé des sols est un concept apparu dans les années 1990, en se basant sur la notion de qualité des sols. Un sol en bonne santé est défini comme « un sol capable de supporter la production agricole, en quantité et qualité suffisante pour répondre aux besoins humains, tout en continuant d'apporter les autres services écosystémiques essentiels à la qualité de vie humaine et à la conservation de la biodiversité » (Kibblewhite *et al.*, 2008). Pour Lehmann *et al.* en 2020, la santé des sol connecte « la pédologie et l'agronomie à la politique, aux besoins des acteurs d'un territoire et à la gestion durable des systèmes alimentaires ». L'évaluation de la santé des sols est, pour eux, un outil de discussion.

A ce jour, la littérature scientifique ne fait pas consensus. Pour certains auteurs, santé des sols et qualité des sols sont des termes interchangeables (Bünemann *et al.*, 2018). Pour d'autres, la nuance est fine

mais correspond à un changement de point de vue : la qualité des sols correspond à la capacité des sols à répondre aux besoins humains avec une notion de potentiel alors que la santé des sols s'intéresse à l'état réel et la capacité des sols à maintenir leurs fonctions (Bünemann *et al.*, 2018; Imaz *et al.*, 2010). L'utilisation d'un des termes peut aussi dépendre du type d'acteurs : chercheurs, politiques, agriculteurs. Nous parlerons ici de santé des sols, un terme plus global. Il est à priori privilégié par les agriculteurs (Bünemann *et al.*, 2018).

Les pratiques agricoles influencent, nous l'avons vu, les sols tant au niveau de sa structure que de sa biologie et cycles biogéochimiques. Ces pratiques – travail du sol, rotation, apports de MO – influencent alors la santé des sols (Imaz *et al.*, 2010). Nunes *et al.*, en 2020, soulignent que les études s'intéressant à l'impact de la réduction du travail du sol sur des indicateurs de santé des sols oublient souvent les pratiques associées. Ils mentionnent l'intégration de couverts végétaux et la diversification de la rotation. L'évaluation de la santé des sols peut permettre d'aider les choix stratégiques des agriculteurs, pour aller vers des pratiques durables intégrant les multifonctionnalités des sols (Andrews *et al.*, 2002).

b. Évaluation de la santé des sols : indicateurs, méthodes

Un des enjeux de l'évaluation de la santé des sols est de réussir à quantifier cette dernière. Le choix des indicateurs est alors une étape décisive (Andrews *et al.*, 2002). Les indicateurs sont souvent classés en trois catégories : physique, chimique et biologique. Ces catégories ne sont pas figées : des indicateurs sont issus de plusieurs processus (Lehmann *et al.*, 2020). Les indicateurs retenus doivent donc pouvoir prendre en compte des changements liés aux pratiques humaines et aux changements naturels (Imaz *et al.*, 2010). Ils doivent être suffisamment sensibles. Trois autres critères de choix sont à considérer : indicateurs pertinents c.à.d. en lien avec les fonctions du sol, informatifs afin d'adopter une stratégie de gestion de la santé des sols et pratiques autrement dit économes et faciles à mesurer (Lehmann *et al.*, 2020).

Les méthodes d'évaluation de la santé des sols se développent depuis quelques décennies. Elles permettent de quantifier l'état de santé des sols et de proposer des stratégies de gestion optimale pour les agroécosystèmes (Lehmann *et al.*, 2020). Une recherche sur le site internet Web of Science (référencement de nombreuses publications scientifiques et techniques) avec l'utilisation des requêtes « *Soil quality assessment*¹ » ou « *Soil health assessment*² » renvoie plus de 500 références : cela inclut les articles de description de méthodes, de choix d'indicateurs et la mise en application des méthodes.

¹ Évaluation de la qualité des sols

² Evaluation de la santé des sols

Certaines méthodes d'évaluation de la santé des sols existantes se basent sur un ou plusieurs objectifs de l'usage des sols étudiés : par exemple la productivité des agroécosystèmes ou la qualité de l'eau (Andrews *et al.*, 2004; Lehmann *et al.*, 2020; Imaz *et al.*, 2010). La méthode d'Andrews *et al.* de 2004, la SMAF pour *Soil Management Assessment Framework* (modèle d'évaluation de la gestion des sols), est une méthode interactive qui permet à l'utilisateur de choisir un ou plusieurs objectifs et lui retourne une liste d'indicateurs pertinents dans ce contexte. Cette approche limite toutefois l'intégration de toutes les fonctions que remplissent un sol : la stratégie de gestion culturale adoptée à la suite de cette évaluation risque de se focaliser sur certaines fonctions, oubliant alors l'interdépendance de celles-ci (Lehmann *et al.*, 2020). D'autres méthodes, comme celle de Brauman et Thoumazeau de 2020, visent à être les plus exhaustives possibles tout en ayant un nombre d'indicateurs limité. L'évaluation de l'état de santé des sols permet de comparer au sein d'un même site différents systèmes.

Tableau 1 – Présentation des indicateurs Biofunctool®, des variables mesurées et des assemblages biologiques ciblés. Brauman, Thoumazeau, 2020 ; modifié par I Breton, 2023

Fonction du sol	Nom de l'indicateur	Variable mesurée	Assemblages biologiques
Cycle des nutriments	<i>NminSoil</i>	Azote disponible (NO_3^- et NH_4^+)	Tous les micro-organismes
	<i>AEMNO3**</i>	NO_3^- fixé sur membranes échangeuses d'ions	Tous les micro-organismes
Dynamique du carbone	<i>POXC</i>	Carbone oxidable au permanganate	Tous les micro-organismes
	<i>SituResp</i>	Respiration basale du sol	Micro-organismes
	<i>Lamina</i>	Lamina baits	Mésofaune
	<i>Fragment*</i>	Biomasse de litière fragmentée	Macrofaune
	<i>Skeleton*</i>	Biomasse de litière skeletonisée	Macrofaune
	<i>Cast*</i>	Densité de turricules de vers de terre	Vers de terre
Maintien de la structure	<i>AggsSoil</i>	Stabilité des agrégats (2-10cm)	Macrofaune, champignons
	<i>AggSurf</i>	Stabilité des agrégats (0-2cm)	Macrofaune, champignons
	<i>Beerkan</i>	Vitesse d'infiltration	Ingénieurs du sol
	<i>VESS</i>	Évaluation visuelle de la structure	Ingénieurs du sol

*Indicateur** : indicateurs facultatifs de la méthode. *Indicateur*** : non considéré dans la présente étude.

Mise au point par A. Brauman et A. Thoumazeau en 2020, la méthode Biofunctool® se base sur des indicateurs fonctionnels qui intègrent le rôle des organismes du sol (Brauman, Thoumazeau, 2020). Les indicateurs biologiques sont peu inclus dans certaines méthodes : il est difficile de faire le lien entre les fonctions du sol et les pratiques agricoles et de quantifier ces indicateurs. Ils sont toutefois

importants et à inclure dans l'évaluation de santé des sols puisque la biodiversité des sols impacte la santé des sols mais aussi celles des Hommes (Wall *et al.*, 2015). En ce sens, Biofunctool® propose une méthode innovante. Cette méthode se veut être un outil accessible, utilisable par des personnes non spécialisées, pratique, sans redondance dans la fonctionnalité des indicateurs et capable d'évaluer les fonctions multiples portées par les assemblages biologiques des sols (Brauman, Thoumazeau, 2020). Pour ce faire, 9 (minimum) à 12 (3 complémentaires) indicateurs de terrains sont considérés (Tableau 1). Ils évaluent les trois fonctions principales d'un sol : le maintien de sa structure, la dynamique du carbone et le cycle des nutriments (Kibblewhite *et al.*, 2008). La dernière fonction décrite par Kibblewhite *et al* est la régulation des populations biologiques du sol.

Pour une production durable de légumes et faire face aux aléas auxquels ils sont exposés, les systèmes maraîchers doivent se tourner vers des pratiques plus respectueuses des sols et plus efficaces en eau. Une combinaison de leviers agroécologiques peut être mobilisable dans ce contexte : la réduction du travail du sol et l'apport de matière organique. Ces facteurs influencent, nous l'avons vu, directement les dynamiques de l'eau dans le sol en modifiant la structure du sol, sa porosité, les propriétés d'infiltration et de rétention d'eau dans le sol. Ils perturbent aussi les activités biologiques du sol et les populations d'organismes. Les systèmes maraîchers sous abris des Pyrénées Orientales sont ciblés ici. Ils font face à des contraintes climatiques très fortes et représentent une part importante de la production horticole française. Les sols étudiés sont limono-sableux.

La problématique est la suivante : **Quels sont les impacts de la réduction du travail du sol associée à des apports de matière organique, sur la dynamique de l'eau et la santé des sols en systèmes maraîchers irrigués sous abris des Pyrénées Orientales ?**

Il est supposé que le NTS associé à des apports de MO permettrait d'améliorer la capacité de rétention de l'eau du sol par une accumulation en surface de MO, au caractère hydrophile à l'état humide, une meilleure stabilité structurale et la création biologique de microporosité (Soane *et al.*, 2012; Imaz *et al.*, 2010). L'infiltration se verrait elle aussi améliorée (Azooz, Arshad, 1996). Le NTS associé à des apports de MO permettrait alors une résilience des agroécosystèmes face au changement climatique et un meilleur niveau de santé des sols. Cette dernière permettrait l'expression des fonctions des sols. Sur des sols limoneux, l'arrêt du travail du sol pourrait entraîner une fermeture du sol avec, en cause, la prise en masse des particules de sols. Cela se traduirait par une augmentation de la densité et la diminution de porosité à court terme. A long terme, l'accumulation de MO (apports massifs de MO, couverts végétaux et résidus de cultures), les activités de bioturbations et l'installation de réseaux mycéliens pourraient compenser ces effets négatifs et recréer de la porosité (Soane *et al.*, 2012).

II. Matériels et Méthodes

Cette partie présente le dispositif expérimental SMART-Sol, les méthodes de mesures du premier cycle de culture et la démarche adoptée pour l'analyse des données récoltées.

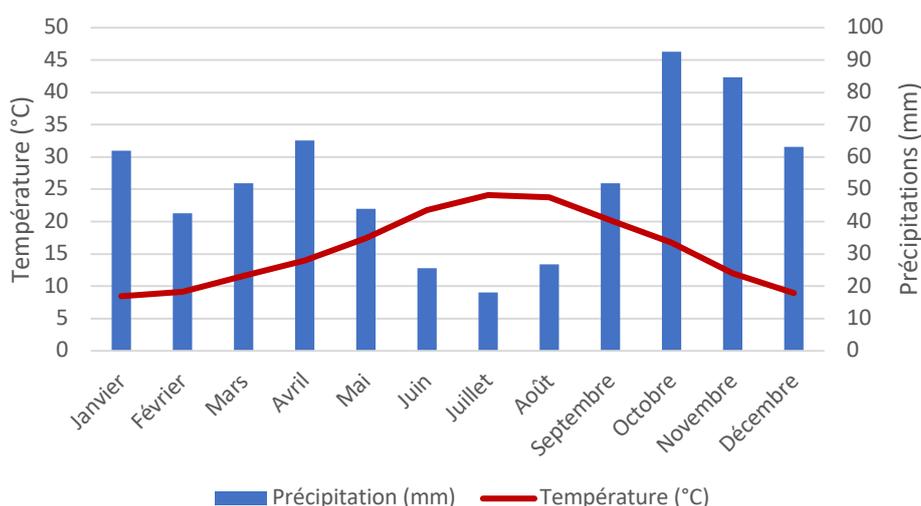
1. Dispositif expérimental

a. Site expérimental

Le site expérimental de l'Unité Expérimentale (UE) Maraîchage d'Alénya met à disposition 4 tunnels pour le dispositif SMART-Sol. Ces tunnels sont dits froids (non chauffés) et de pleine terre par opposition aux systèmes de culture hors-sol. Les tunnels sont installés depuis 1999, ils mesurent 8 m de large et 40 à 50 m de long. Les sols sont profonds, limono-sableux (sensibles à la battance) et peu caillouteux.

Alénya est exposé à un climat Méditerranéen avec des étés chauds et secs et des hivers marqués et doux (la moyenne mensuelle n'est jamais inférieure à 0°C). La Figure 3 présente le diagramme ombrothermique de l'UE sur les 30 dernières années. Le respect de la convention graphique d'un facteur 2 entre les échelles de température et de précipitation (Bagnouls, Gaussen, 1957) permet de mettre en évidence 3 mois secs à savoir juin, juillet et août pendant lesquels les précipitations sont inférieures à la courbe des températures. Sur ces périodes, la végétation doit faire face à des épisodes de stress hydrique.

Figure 3 – Diagramme ombrothermique de la station météo de l'unité expérimentale d'Alénya
I. Breton, 2023 d'après les données climatiques de la station sur 30 ans (05/1993-05/2023)



Les précipitations annuelles moyennes sur 30 ans sont de 639 mm et la température annuelle médiane est de 15,2°C. Ces dernières années, l'aridité semble s'accroître : la pluviométrie moyenne entre 2012 et 2022 est de 573 mm, et la différence à l'évapotranspiration potentielle (ETP)* de - 561 mm (contre - 474 mm de normale sur 30 ans). La température médiane sur 2012-2022 est de 15,4°C.

b. Présentation des différents systèmes

Sur le dispositif SMART-Sol, quatre systèmes sont étudiés à moyen terme : plusieurs modalités de travail des sols sont associées à des modalités d'apport de MO, toutes choses égales par ailleurs (Tableau 2).

Tableau 2 – Modalités expérimentales SMART-Sol Alénia – I. Breton, 2023

Modalités / Systèmes	Travail du sol	Matière organique
Tunnel de référence T-ref	Travail usuel. Pas de contraintes, profondeur de travail \pm 30 cm	Compost de déchets verts, apport usuel (30 T.ha ⁻¹) tous les 2 ans
Tunnel Travail Non Animé T-NA	Travail limité à l'utilisation d'outils non animés sans prise de force. Profondeur de travail \pm 30 cm	Compost de déchets verts, apport usuel (30 T.ha ⁻¹) tous les 2 ans
Tunnel Travail Non Animé superficiel T-NA^{sup}	Travail limité à l'utilisation d'outils non animés, profondeur de travail superficielle inférieure à 10 cm	Compost de déchets verts, apport massif (120 T.ha ⁻¹) tous les 2 ans
Tunnel en Non-Travail NT	Non-Travail du sol	Compost de déchets verts, apport massif (120 T.ha ⁻¹) tous les 2 ans

Les 4 modalités de travail du sol sont fixées selon un gradient d'intensité de perturbation. On retrouve les différentes classes de systèmes de travail du sol proposées par Roger-Estrade *et al.* en 2014 : > **L'intensité de travail la plus forte en modalité T-ref** est basée sur les pratiques usuelles observées en systèmes maraîchers d'Occitanie. Ces systèmes cherchent à obtenir un lit de semence optimal avec de la terre très fine. A noter, la profondeur de travail dépend fortement des systèmes étudiés et des références techniques. Pour une étude californienne par exemple, sur du maraîchage de plein champ, le travail usuel de référence est un labour à 50 cm de profondeur (Jackson *et al.*, 2004).

> **La modalité de travail non animé T-NA** intègre l'impact sur le sol du type d'outil : un outil non animé est à priori moins intensif qu'un outil animé.

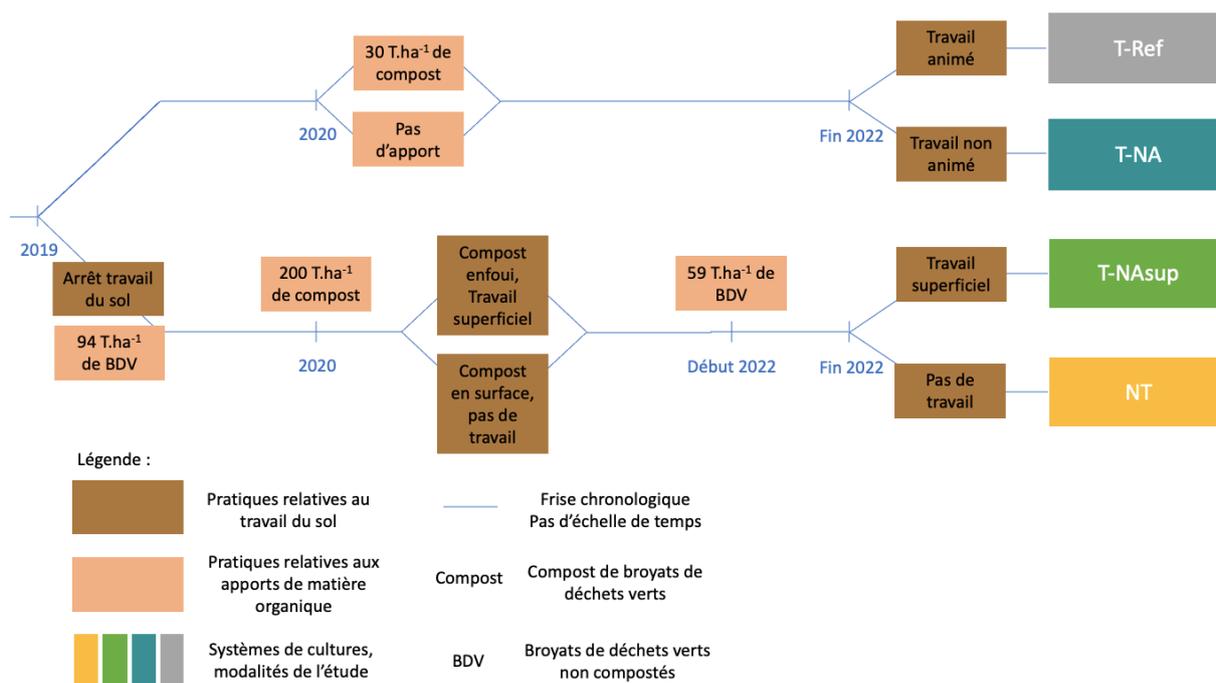
> **La modalité de travail non animé superficiel T-NA^{sup}** permet d'évaluer l'effet de réduction de la profondeur de travail du sol sur la performance du système.

> **La modalité non travaillée NT** s'inspire des pratiques mises en avant par le réseau MSV, à savoir le non travail, la couverture du sol et l'apport de MO (Réseau Maraîchage Sol Vivant, 2021).

Les modalités d'apports de matière organique (MO) ont été réfléchies en parallèle des modalités de travail du sol. Des apports exogènes de type compost de broyats de déchets verts sont prévus tous les deux ans. Le premier apport sera réalisé en 2024. La modalité usuelle est définie en se basant sur les apports de compost conseillés en maraîchage sous abris. Depuis une quinzaine d'année, l'apport usuel de compost de l'unité sur ses systèmes aux sols travaillés est d'environ 30 T.ha⁻¹. Les quantités d'apport

de MO massif sur les systèmes pas et peu travaillés ne sont pas encore fixées de façon définitive. Elles seraient d'environ 120 T.ha⁻¹ afin d'augmenter le taux de MO et de favoriser les organismes du sol. Cela s'inspire des apports observés en maraîchage sur sols vivants mais reste réaliste sur la disponibilité de la ressource de MO sur les territoires et limite les risques de pertes de nitrates en profondeur. Sur tous les tunnels, des engrais verts sont implantés un an sur deux en période d'interculture. Ils sont roulés pour le système non travaillé **NT** et broyés puis enfouis pour les 3 autres systèmes.

Figure 4 – Historique des parcelles et modalité de l'étude – I. Breton, 2023



Le dispositif SMART-Sol étant très récent, les parcelles étudiées dans le cadre de ce mémoire sont grandement liées à l'historique des pratiques. Celui-ci est présenté en Figure 4. L'historique exhaustif des apports de compost et de broyats de déchets verts depuis 2016 ainsi que les compositions respectives de ces MO sont disponibles en Annexe 1. Pour cette étude, on a alors les systèmes suivants :

- **T-ref**, le tunnel de travail de référence associé à un apport de compost de 30 T.ha⁻¹ en 2020 ;
- **T-NA**, le système en travail du sol non animé associé à des apports de compost peu fréquents, antérieurs à 2019 ;
- **T-NA sup**, le système faiblement travaillé dont la reprise du travail du sol date de 2022, apport de 200 T.ha⁻¹ de compost en 2020 et 59 T.ha⁻¹ de BDV en 2022 ;
- **NT**, le système non travaillé depuis 2019 associé à un apport de 200 T.ha⁻¹ de compost en 2020 et 59 T.ha⁻¹ de BDV en 2022.

A ce jour, les systèmes **T-NA sup** et **NT** sont donc très proches ; la différenciation du travail du sol date de l'implantation de la culture 2022.

c. Mise en place de l'expérimentation

Les 4 tunnels sont cultivés en 6 rangs simples, les 4 rangs centraux sont retenus pour le dispositif expérimental : en effet, les cultures en bordure de tunnel sont exposées à des conditions climatiques différentes. Pour un cycle cultural donné, la même culture est implantée sur toute la surface d'expérimentation. Sur le premier cycle « été 2023 » et la durée du stage, il s'agit de concombre de variété Diapason. Cette culture a été sélectionnée au regard des précédents culturaux de chaque tunnel – conduits sur différents projets par le passé soit différentes cultures – et des critères de rotation*(Annexe 2). Les bordures sont conduites en melon pour l'été 2023 : cela permet de diminuer la charge de travail par rapport au concombre, de faciliter l'écoulement de la production dans les différents canaux de commercialisation tout en respectant les critères de rotation. Les 4 tunnels ont la même rotation sur toute la durée du dispositif.

Différentes Zones d'Acquisition de la Donnée (ZAD) au sein de chaque tunnel forment les unités statistiques appelées pseudo-répliques* (Figure 5). Il s'agit de :

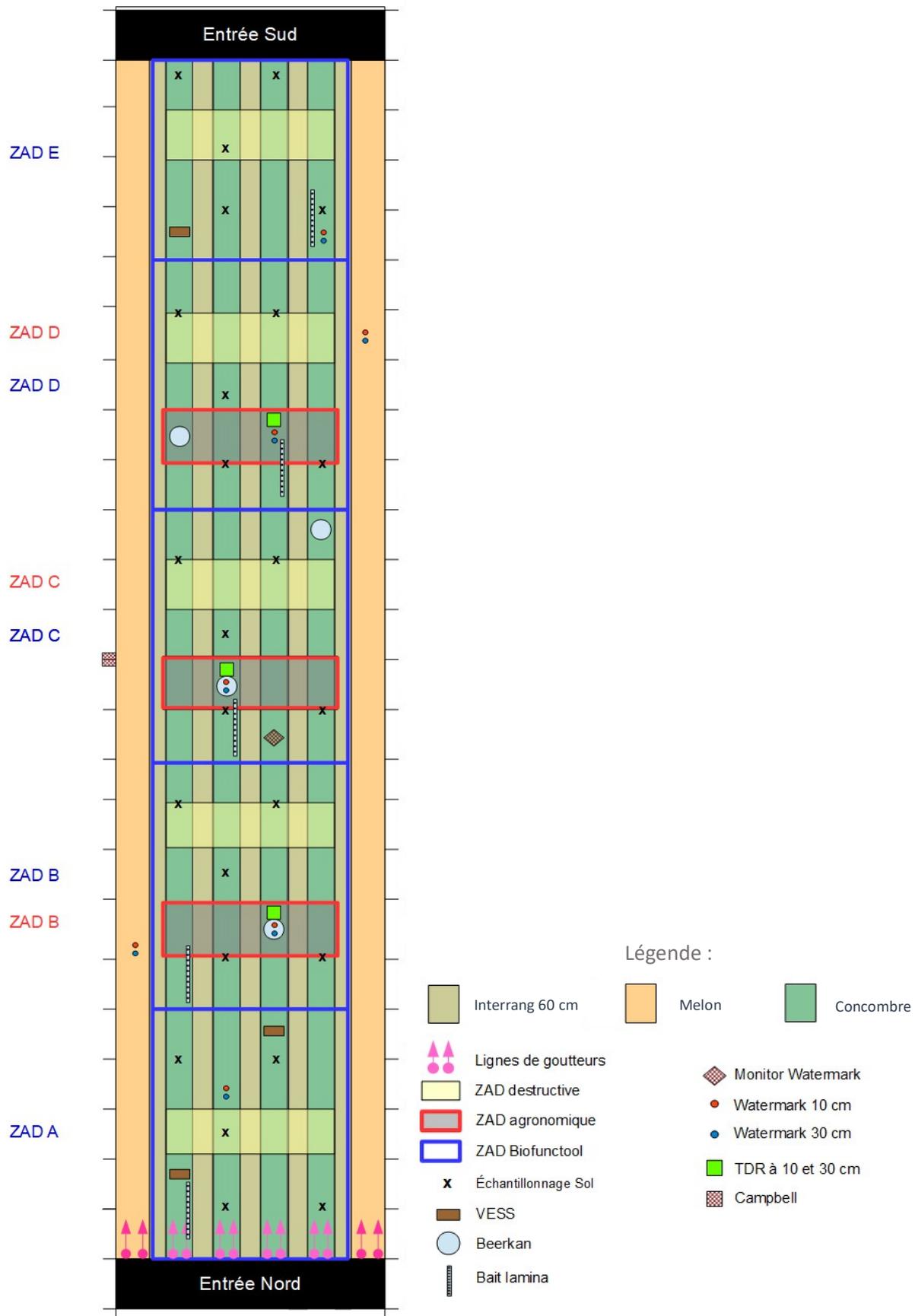
- 3 ZAD Agronomiques (en rouge) composées de 12 plantes : suivi des composantes du rendement (rendements commerciaux et pertes), 3 mesures par semaine sur la période de production ;
- 5 ZAD Destructives (en jaune) composées de 12 plants : mesures ponctuelles destructives pour la plante ou le sol (évaluation de la biomasse aérienne, prélèvement de racines, évaluation visuelle de la structure du sol *VESS*) ;
- 5 ZAD Biofunctool® (en bleu): suivis de la santé des sols avant la mise en place de la culture (échantillonnage et tests Biofunctool®). La méthode Biofunctool® est présentée dans le paragraphe 2.b.

Remarque : la Figure 5 est réutilisée dans la partie 2.b. pour la présentation de la méthode Biofunctool®. Les noms d'indicateurs (e.g. *Beerkan*, *VESS*) en légende permettent de situer les points de mesures mentionnés plus bas.

i. Préparation des tunnels

En amont de la plantation, une irrigation est effectuée dans le tunnel non travaillé depuis 2019 **NT** pour ramollir le sol et faciliter la réalisation des trous de plantation : 45,5 mm d'eau ont été apportés de façon fractionnée. Sur les autres modalités, des arrosages peuvent être effectués afin de faciliter le travail du sol. Cela a été nécessaire en **T-NA^{sup}** : 5,7 mm d'eau avant le travail du sol ont été apportés. Les rangs sont couverts d'un paillage plastique et les inter-rangs, d'une bâche tissée résistante au passage de chariots de récolte. Cette couverture du sol limite le développement des adventices.

Figure 5 – Dispositif expérimental pour chaque tunnel sur la période printemps-été 2023 - L Parès, I Breton, 2023



ii. Fertilisation

La fertilisation est réfléchi à court et moyen terme par des apports d'engrais organiques en début de cycle. Elle vient en complément des apports de MO. Les apports d'engrais organiques sont basés sur les besoins en Azote-Phosphore-Potassium (N-P-K) de la culture. Ils sont incorporés au sol pour les modalités travaillées et laissés en surface dans le tunnel non travaillé **NT**. Trois types d'engrais sont apportés (Tableau 3) :

- Un engrais simple rapidement disponible pour les plantes, le Vio Orga N13. Il est riche en azote et est composé de matières animales (Annexe 3). L'apport est calculé sur la base suivante :
Apport = 50% des besoins en azote de la plante – reliquats azotés cultures précédentes
- Un engrais dit ternaire apportant de l'azote, du phosphore et du potassium (7-4-11), l'Orgaliz CV. Il est moins rapidement assimilable par les plantes et est composé de matières animales et végétales (Annexe 3). L'apport correspond à 50% des besoins en azote de la plante. Il complète ainsi Vio Orga N13 et apporte en plus du phosphore et du potassium.
- Du sulfate de potasse. Cet engrais complète les besoins en potassium de la plante.

Tableau 3 – Apports engrais en début de culture de concombres, avril 2023. Calculs et données issues de l'outil interne de fertilisation. L Parès, 2023

Apports en g.m ⁻²	Vio Orga N13	Orgaliz CV	Sulfate de potasse
T-ref	152,9	350	2,86
T-NA	158,5	350	2,86
T-NA^{sup}	148,5	350	2,86
NT	145	350	2,86

iii. Protection des cultures

Dans tous les tunnels, des pièges chromatiques jaunes et bleus englués sont installés au moment de la plantation. Ils permettent de réduire les populations de certains ravageurs : thrips, aleurodes, pucerons... Des bandes fleuries et des allysons (*Lobularia maritima*) sont mises en place en bordure des parcelles pour favoriser les auxiliaires spontanés. La lutte biologique est pratiquée avec des lâchés d'auxiliaires : *A. swirskii* et *N. californicus*, acariens prédateurs ; *A. colemani*, pucerons prédateurs. La pression ravageur restant importante, un traitement au soufre est réalisé mi-juin.

iv. Irrigation

En tout début de cycle, l'irrigation est réalisée à la lance, plant par plant pour assurer une bonne reprise racinaire. Cet apport d'eau n'a pas été mesuré, il représente entre 1 et 2 litres par plants. Par la

suite, l'irrigation se fait en goutte à goutte : deux lignes de goutteurs par rangs sont installées. Les tunnels sont aussi équipés d'asperseurs. L'aspersion peut être mobilisée afin d'améliorer la gestion climatologique du tunnel. Cela n'a pas été le cas sur le cycle « Été 2023 ».

De façon hebdomadaire, les statuts sanitaire et hydrique sont contrôlés par un bilan de culture : des appréciations visuelles et d'expertises sont réalisées. En complément et spécifiquement pour le pilotage de l'irrigation se tient chaque semaine une cellule d'expertise analysant la remontée des données quantitatives des sondes tensiométriques. Le contexte de sécheresse dans le département impose une réduction des irrigations de - 25% pour les systèmes en goutte à goutte par rapport à la normale afin de préserver la ressource en eau (arrêtés préfectoraux). Ainsi, sur les cultures d'été, l'irrigation est lancée quasiment tous les jours en automatique selon cette formule :

$$Dose\ irrigation = ETP \times K_c \times 0,75$$

$$Si \sum ETP_{jour} > Seuil_{ETP} \text{ alors Dose irrigation appliquée}$$

Avec : ETP = Evapotranspiration potentielle*, K_c = Coefficient cultural*, Seuil_{ETP} = seuil de cumul d'ETP au-delà duquel un arrosage est déclenché (seuil de 4 mm à partir du 05/06).

2. Méthodes de mesures : récolte des données pour la construction d'indicateurs

a. Méthode Biofunctool®

L'évaluation de la santé des sols du dispositif expérimental est réalisée avec la méthode Biofunctool® (Brauman, Thoumazeau, 2020). Les mesures sont complétées par une analyse physico-chimique des sols en laboratoire d'analyse et par l'observation des endomycorhizes (cf §2.c.).

Sept indicateurs de la méthode Biofunctool® sont mesurés. Le 8^e indicateur de la méthode est l'évaluation de la dynamique des nutriments par des mesures sur membranes échangeuses d'ions. Cela nécessite du matériel de laboratoire très spécifique, coûteux et des analyses non réalisables en interne. Il ne sera pas pris en compte pour l'évaluation de la santé des sols de 2023. Pour les indicateurs étudiés nécessitant des manipulations *ex situ*, les échantillonnages de sols ont été réalisés à la tarière sur une profondeur de 0-15 cm. Par ZAD Biofunctool®, c.à.d. pseudo-répliqua, 5 points de prélèvement de sol sont définis avec 2 prélèvements par points (Figure 5). On obtient ainsi 310 g de sol par ZAD. Les échantillons prélevés par ZAD sont regroupés en échantillon composite. Des aliquotes ou fractions des 20 échantillons composites obtenus (5 ZAD x 4 modalités) ont été envoyés au laboratoire d'analyse des sols INRAE d'Arras pour une caractérisation physico-chimique (texture, pH, carbone organique etc.).

Les mesures de la méthode Biofunctool® sont effectuées à un instant T, avant perturbation du sol. Un ensemble de mesures ou campagne d'évaluation de la santé des sols est prévu par an sur le dispositif

expérimental, réalisé en fin de culture d'hiver et avant le travail du sol. Cette période est optimale pour éviter les températures extrêmes estivales ou hivernales qui ralentissent l'activité des organismes du sol (Brauman, Thoumazeau, 2020). Les premières mesures sur le dispositif SMART-Sol, en 2023, ont pour objectif d'évaluer l'état de santé des sols initial des parcelles.

Le POXC pour Carbone OXYdable au Permanganate est la méthode de mesure de la **fraction de carbone organique labile du sol** – c.à.d. le carbone facilement accessible par les organismes du sol. Pour chaque échantillon, 2,5 gr de sol tamisé et séché à l'air libre est mis en solution avec du permanganate de potassium KMnO_4 diluée à 0,02M par une agitation homogène de 2 min. Après 10 min de repos, l'absorbance de la solution à 550 nm est lue. La gamme étalon en 4 points permet de calculer la concentration de POXC en $\text{mgC.kg}^{-1}_{\text{sol sec}}$.

*Figure 6 – Incubation Situresp.
I Breton, 2023*



La respiration basale du sol *SituResp* évalue l'émission de CO_2 du sol par l'activité microbienne d'un échantillon de 100 gr de sol frais. Le sol tamisé est mis dans un bocal hermétique avec un gel coloré au rouge de crésol (Figure 6). Ce gel rouge est sensible aux variations de pH et devient jaune au contact de CO_2 . Son absorbance est mesurée à 570 nm à T_0 puis après 24h (Brauman, Thoumazeau, 2020). La différence d'absorbance permet d'obtenir la production de CO_2 émise par les organismes du sol.

L'activité de dégradation de substrats carbonés par les organismes du sol

est mesurée par le test « bait lamina », signifiant littéralement lame d'appât. Ce test consiste à remplir d'un substrat organique les 16 trous des languettes en PLA (Polyamide lactique, polymère utilisé dans les imprimantes 3D), présentées en Figure 7. Le substrat est fabriqué à partir de farine, de cellulose, de charbon (proportion 1 - 2,3 - 0,7) et d'une solution d'agar à 10% dans de l'eau déminéralisée. Par zone d'échantillonnage, 8 bait laminas sont plantés verticalement dans le sol permettant un contact du substrat avec le sol. Les bait laminas sont espacés de 30 cm. Il y en a 7 pour la mesure et le 8^e permet de vérifier la

Figure 7 – Bait lamina après incubation in situ sur rangs de blettes. I Breton, 2023



vitesse de dégradation sur le temps d'implantation. Le temps d'incubation dépend de l'activité des organismes. Les bait laminas sont sortis de terre tous en même temps, lorsque ceux de référence dépassent 75% de dégradation pour une modalité. En mars 2023, le temps d'incubation a duré 16 jours.

L'azote (sous forme de nitrate) disponible dans le sol est mesuré par Nitra-test. Cette méthode consiste à doser les nitrates du sol par colorimétrie avec des bandelettes-tests. Les bandelettes-tests Reflectoquant® sont utilisées (Figure 8). Chaque échantillon de sol est mis en solution avec de l'eau

Figure 8 – Bandelettes-test, Tunnel non travaillé NT. I Breton, 2023



déminéralisée (1:1 m/v). Après filtration, une bandelette-test est plongée dans la solution : elle réagit à la concentration de nitrates en se colorant en rouge-violet. L'intensité de la couleur est mesurée par réflectométrie et donne la concentration en nitrates en mg.L^{-1} , convertie en $\text{mg NO}_3^- \cdot \text{kg}^{-1} \text{sol sec.}$

L'évaluation visuelle de la structure (VESS) s'effectue sur un bloc de sol extrait et non remanié de 20 cm x 20 cm de surface et 25 cm de profondeur (Guimarães *et al.*, 2011). Chaque horizon est observé à l'aide d'une fiche descriptive disponible en Annexe 4 : la structure, la porosité et les agrégats sont les principales composantes observées. Une note comprise entre 1 et 5 est attribuée par horizon de sol puis par bloc de sol. 3 VESS par modalités sont réalisées.

La stabilité des agrégats de surface et de profondeur *AggSurf* et *AggSoil* est évaluée par le Slake test ou test de sédimentation (Figure 9). Ce test consiste à immerger pendant 5 minutes dans une lame d'eau de 1-2 cm 6 agrégats homogènes (d'environ 1 cm) et séchés à l'air par échantillon. Les agrégats sont ensuite soumis à 5 va-et-vient dans l'eau. Une note comprise entre 0 et 6 est attribuée à chaque agrégat en fonction de sa désagrégation après immersion et mouvement dans l'eau. La table d'attribution des scores est disponible en Annexe 5. Pour chaque échantillon, deux tests de sédimentation sont réalisés : le premier avec les 6 agrégats prélevés entre 0 et 10 cm, le second avec les 6 autres prélevés entre 10 et 25 cm.

Figure 9 – Test de sédimentation, tamis support pour l'immersion des agrégats. I Breton, 2023



La vitesse d'infiltration de l'eau dans le sol est mesurée par le test Beerkan. Ce test consiste à apporter plusieurs fois une colonne d'eau fixe à la surface du sol. La zone de sol est délimitée par un cylindre en PVC de 30 cm de diamètre, enfoncés sur 3 centimètres. Après infiltration d'une première bouteille, une nouvelle dose de 500 mL est versée. Cela est répété 10 fois. Des limites de temps sont fixées : 5 minutes de mesures minimums dans le cas où l'infiltration est très rapide et dépasse les 10 bouteilles (10 x 500 mL) ; 30 minutes d'attente maximum dans le cas inverse, lorsque les 10 bouteilles ne peuvent pas être versées en surface. 4 tests Beerkan par modalité sont réalisés (Figure 5).

b. Des indicateurs de contexte pour Biofunctool : densité apparente et humidité

Afin de mieux connaître les sols étudiés, la densité apparente (DA) et l'humidité des sols sont mesurées. Ces indicateurs apportent des éléments de contexte pour les résultats de santé des sols. Les DA permettent en plus un premier calibrage des sondes hydriques.

La DA est mesurée à deux profondeurs : 10 et 30 cm. Elle est mesurée par prélèvement d'un volume de 100 cm³ de sol. L'échantillonnage est réalisé à l'installation des capteurs hydriques : il y a 3 répétitions par modalité. Le sol est séché à l'étuve à 105°C, la densité est calculée en cm³.g⁻¹ de sol sec.

L'humidité pondérale des sols est mesurée sur un échantillon de 100 g de sol : il s'agit de la différence entre la masse fraîche et sèche de celui-ci. L'échantillonnage est le même que pour les indicateurs Biofunctool® soit 5 mesures par modalité.

c. Observation d'endomycorhizes

Pour évaluer la santé des sols, il est choisi en plus des indicateurs de la méthode Biofunctool® d'observer les endomycorhizes à arbuscules sur les racines de la culture d'hiver. En effet, des études montrent que ces organismes mycorhiziens sont négativement impactés par le travail du sol tant en termes de diversité que de taux de mycorhization. Or les endomycorhizes jouent un rôle dans la nutrition des plantes : elles rendent disponibles le phosphore dans le sol et peuvent soutenir l'alimentation hydrique et minérale des plantes en échanges de produits de la photosynthèse (Garbaye, 2013). La période de prélèvement racinaire choisie permet des conditions d'échantillonnage proches de la méthode employée sur Biofunctool® et d'ainsi pouvoir discuter des résultats.

L'échantillonnage est réalisé à la fin de la culture d'hiver dans les ZAD Destructives, 3 systèmes racinaires de fenouil sont prélevés par ZAD. Les systèmes racinaires ont été nettoyés à l'eau claire et les radicelles échantillonnées. Ces dernières sont traitées pour vider en partie les cellules racinaires et les colorer à l'encre noire : cela fait ressortir les structures des endomycorhizes en bleu/violet. Les échantillons sont conservés dans une solution d'acétoglycérol avant observation. Pour chaque échantillon, une lame de 25 fragments de 1 cm de racine est préparée et observée au microscope à un grossissement x 40 minimum (Figure 10). Les pourcentages de taux de colonisation par les AMF, les arbuscules et les vésicules sont comptés selon la grille de lecture de Trouvelot et al. 1986 disponible en Annexe 6.

Figure 10 – Lame préparée de 25 fragments. | Breton, 2023



Les analyses physico-chimiques des sols, l'évaluation de santé des sols et l'observation des AMF permettent l'évaluation de la performance des systèmes sur la partie Santé des sols.

d. Performance agronomique

La performance agronomique des systèmes est étudiée sur le cycle de culture « Été 2023 ». Elle inclut des mesures de reprise et de rendement.

La mesure de reprise végétative est effectuée 20 jours après la plantation. A cette date, il est estimé sur le terrain que les plants de concombres ont développé leurs systèmes racinaires en dehors de la motte de terreaux. Cela s'observe au niveau des bourgeons apicaux* des plants : ils se situent au-dessus des dernières feuilles témoignant d'une accélération de vitesse de croissance. La reprise est évaluée par prélèvement de biomasse, 4 plants par ZAD destructives sont prélevés. Ils sont pesés frais et secs afin de comparer les masses de matière sèche et les taux d'humidité entre les modalités.

Les mesures de rendements sont réalisées sur la culture de concombres 3 fois par semaine. La récolte débute le 31/05 et les mesures sont arrêtées le 30/06. Cela fait un total de 14 récoltes. Les mesures sont réalisées sur les récoltes des ZAD agronomiques soit sur 36 plants par modalités (12 plants x 3 ZAD). Les rendements par modalité sont étudiés en biomasse de fruits c.à.d. en nombre et poids de concombres. Pour plus de légèreté à la lecture, le terme rendement sera systématiquement employé dans cette étude comme un rendement de biomasse de fruits. Les rendements sont découpés en plusieurs catégories. Le rendement de biomasse de fruits totale correspond à tous les fruits récoltés. Le rendement commercial inclut les fruits conformes à la vente en gros, avec un poids à l'unité compris entre 300 et 600 g. Le rendement non commercial comprend les fruits non conformes : un fruit est déclassé soit à cause d'un poids en dehors de l'intervalle de conformité, soit de sa morphologie (tordu, en forme de bouteille) ou de son état sanitaire (acariens, pucerons, mollusques).

e. Les capteurs : température, sondes hydriques

L'eau présente dans un sol peut être quantifiée par deux variables : l'humidité volumique et le potentiel hydrique matriciel (Ψ_m). L'humidité volumique est le volume d'eau présent dans le sol en $m^3 \cdot m^{-3}$; le potentiel hydrique matriciel retranscrit la force de succion que la plante doit déployer pour récupérer l'eau présente dans le sol, exprimé en unité de pression (Delalande *et al.*, 2017). Sur le dispositif expérimental, des mesures *in situ* sont réalisées avec des remontées continues des données.

Les sondes TDR (Time Domain Reflectometry) sont des sondes permettant d'obtenir indirectement l'humidité volumique. Elles sont installées à 10 et 30 cm de profondeur : 3 couples par modalité sont enfouis horizontalement dans le sol. Sur le rang de concombres, les sondes sont positionnées entre deux goutteurs et croisent les deux lignes de goutteurs. Ces dernières se dilatent avec les températures élevées des tunnels l'été, des goutteurs équipés de capillaires sont mis en place sur les lignes aux abords des sondes : il s'agit de goutteurs fixes à planter dans le sol. Cela permet une installation identique entre toutes les TDR, tout l'été. Une première calibration des sondes a été faite en se basant sur les données de densité apparente mesurée. Un ajustement sera nécessaire par la suite. Les données comprises entre 0 et 1 $m^3 \cdot m^{-3}$ remontent automatiquement toutes les 5 minutes par une centrale d'acquisition Campbell®.

Les sondes Watermark®, sondes dites tensiométriques, permettent de mesurer le potentiel hydrique. Il est exprimé en tension comprise entre 0 cbar (sol saturé en eau) et 200 cbar (sol en cours de dessèchement ; Wittling, Ruelle, 2022). Au-delà de cette gamme de mesure le Watermark® « décroche », cela signifie qu'il ne remonte plus de données même si le sol se réhydrate (Delalande et al., 2017). Les sondes Watermark® sont installées à 10 et 30cm de profondeur : 5 couples (1 couple par ZAD) sont positionnés sur les rangs de concombres, parallèlement à celui-ci. Les deux sondes d'un couple sont espacées de 10 cm et positionnées face aux goutteurs. Les données remontent toutes les 4 heures sur un monitor et sont enregistrées sur des cartes mémoire à relever manuellement.

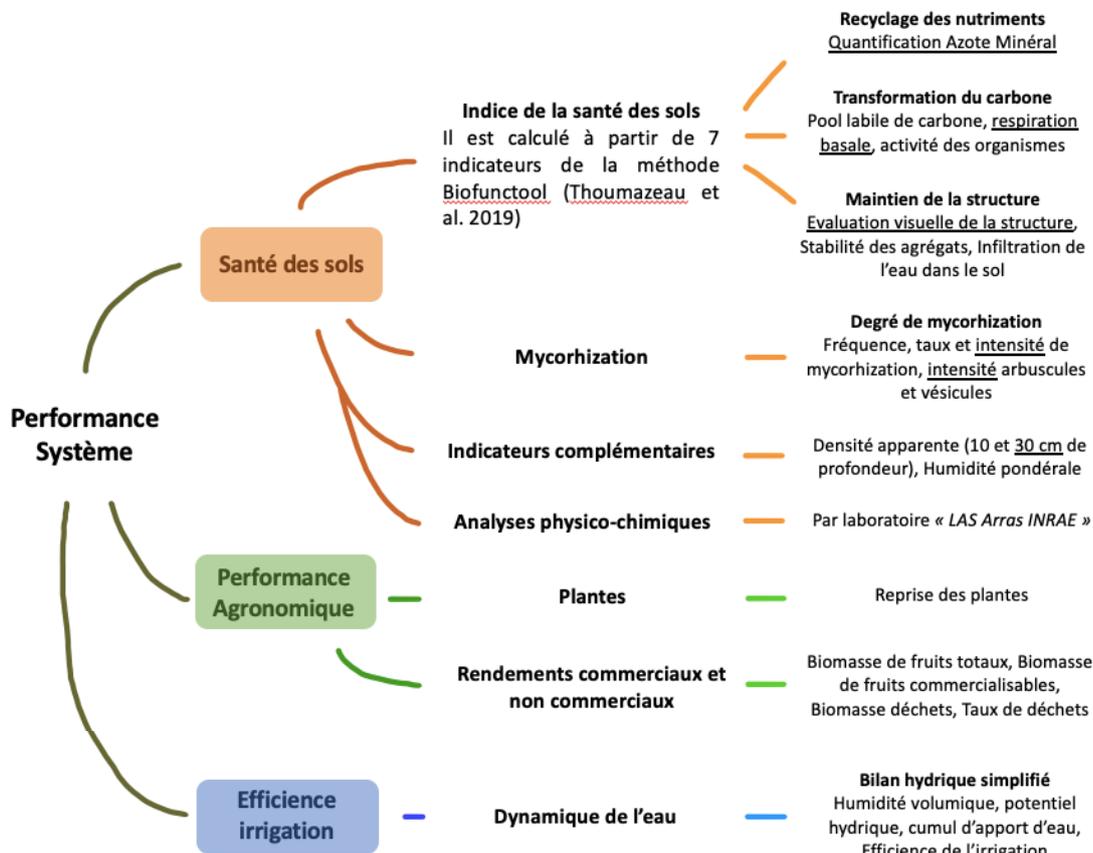
Ces capteurs permettent une compréhension de la dynamique de l'eau dans le sol. En complément, les données d'irrigation (apports et fréquences d'apports) sont remontées par le logiciel de gestion automatique des irrigations. Cela permet l'élaboration d'indicateurs tels que le cumul d'eau apportée et l'efficacité de l'utilisation de l'eau (rapport entre quantité apportée et rendement total).

3. Traitements et analyses des données

a. Indicateurs

Les modalités sont étudiées au regard de la santé des sols, de leur performance agronomique et de l'efficacité de l'irrigation pour une évaluation multicritère (Figure 11).

Figure 11 – Indicateurs de l'évaluation multicritère. I Breton, 2023



La construction des indicateurs se fait sur :

- L'application de traitement des données et de statistiques RStudio (libre de droit, version 4.3.0) pour les endomycorhizes et les indicateurs agronomiques ;
- Le logiciel tableur Microsoft Excel pour Biofunctool® – saisie des données à la main et calcul automatisé par un document Excel des auteurs de la méthode – et pour les indicateurs relatifs à l'efficacité de l'irrigation – bug du logiciel R au moment du traitement.

Le taux de non-commercialisation est calculé par le ratio entre le rendement de déchets et le rendement total. L'efficacité de l'irrigation est un indicateur calculé par le ratio entre le rendement total sur le cycle de la culture et la quantité d'eau apportée totale : il répond à la question « *Combien de kg de concombres (commercialisables ou non) sont produits par litre d'eau ?* ».

b. Traitements statistiques

Les indicateurs de la méthode Biofunctool®, de l'observation des AMF et de la partie agronomique sont étudiés par tests statistiques, présentés ci-après.

L'effet du système (travail du sol et apport de MO) est étudié indicateur par indicateur à l'aide d'une analyse univariée des variances à un facteur (ANOVA). Ce test compare les moyennes des différentes modalités et permet de savoir si les différences observées sont statistiquement significatives. En fonction de la répartition des données mesurées, un type d'ANOVA est utilisé : on distingue deux types, les ANOVA paramétriques et non paramétriques. L'ANOVA paramétrique est utilisée lorsque les variances sont homogènes (test statistique de Bartlett), les résidus indépendants (test de Durbin-Watson) et normaux (test de Shapiro-Wilk). Si ces trois hypothèses ne sont pas validées, les données sont analysées par une ANOVA non paramétrique avec le test de Kruskal-Wallis. Pour chaque indicateur, l'ANOVA retourne une p-value soit une probabilité de n'obtenir aucune différence pour un indicateur, entre deux modalités. Le seuil d'erreur est fixé pour tous les tests à 0,05. Ainsi, si la p-value est inférieure à 0,05, on peut conclure qu'il y a un effet d'au moins une modalité sur le résultat de l'indicateur. Les indicateurs soulignés dans la Figure 11 sont ceux analysés avec le test non paramétrique de Kruskal-Wallis.

Des traitements *post hoc* sont réalisés afin de comprendre la nature des différences observées par ANOVA. Ils répondent à la question : « *quelles modalités sont significativement différentes vis-à-vis d'un indicateur donné ?* » Les modalités sont comparées deux à deux. Pour les ANOVA paramétriques, le test de Tukey HSD est utilisé. Pour les ANOVA non paramétriques, le test de Wilcoxon avec la méthode Bonferroni est utilisé. Dans les deux cas, le seuil de significativité est de 0,05. Des p-values comprises entre 0,05 et 0,1 sont discutées, les modalités sont alors dites potentiellement différentes.

Sur la partie Biofunctool®, des corrélations entre indicateurs peuvent s'observer au moyen d'une analyse multivariée des composantes principales (ACP). En effet, dans la méthode, les indicateurs choisis sont complémentaires et permettent d'obtenir une vision globale de la santé des sols étudiés. L'ACP permet d'étudier sur plusieurs dimensions le comportement de nombreuses variables quantitatives et la répartition des individus. Des variables supplémentaires ont été ajoutées : l'humidité du sol et les densités apparentes. Cela permet d'aller plus loin dans la compréhension des corrélations. Une ACP globale avec l'indice de santé des sols, la fréquence et le taux de mycorhization, les rendements, les cumuls d'irrigation et l'efficacité de l'irrigation est réalisée pour une analyse multicritère de la performance des systèmes étudiés.

c. Analyses des données

Sur l'indicateur de dégradation de substrats carbonés par les organismes du sol, l'effet profondeur a été analysé en considérant chaque trou de la lame bait lamina comme une variable. Les trous 1 à 7 puis 10, 13 et 16 ont ainsi été analysés par ANOVA. Ceux-ci donnent une bonne représentativité des données, particulièrement significatives en surface.

In fine, la méthode Biofunctool® permet de construire un Indice de Santé des Sols (ou Soil Health Index SHI) pour chaque modalité et de réaliser une comparaison entre les systèmes. Le SHI est calculé à partir des indicateurs normalisés, c.à.d. ramenés à un score compris entre 0 et 1. Pour tous les indicateurs sauf l'évaluation visuelle de la structure, plus la note est élevée mieux c'est : « *the more the better* ». Pour ce dernier indicateur, on cherche à obtenir une valeur optimale fixée à 2,5/5. Cette note correspond à un sol ni trop friable ni trop compact.

L'indice SHI est ensuite construit par la formule suivante :

$$SHI = \sum_{i=1}^n S_i \times W_i$$

Avec SHI : Soil Health Index, S_i : le score normalisé de l'indicateur i , W_i : la contribution de l'indicateur i à chaque dimension de l'Analyse au Composante Principale.

Les données des sondes hydriques sont explorées dans ce mémoire, avec une première manipulation des données sur les sondes situées à 10 cm de profondeur. Le 17 mai est retenu comme une date à laquelle les 4 tunnels du dispositif sont irrigués en même temps. La cohérence des valeurs obtenue pour les trois sondes TDR est vérifiée (réponse à l'irrigation). Le temps d'humidification du sol puis de dessiccation du sol avant l'irrigation suivante est étudié pour chaque modalité. Les coefficients de la pente des courbes d'humidité volumique, c.à.d. les coefficients directeurs des courbes de régression linéaire, sont comparés.

III. Santé des sols : résultats et discussions

Cette partie présente les résultats de la campagne d'évaluation de la santé des sols de mars 2023, avec la caractérisation physico-chimique des sols, les résultats Biofunctool® et les estimations de mycorhization des systèmes racinaires. Chaque résultat est discuté en violet (idem en IV et V).

1. Propriétés physico-chimiques des sols étudiés

Les résultats des analyses de sols du laboratoire « LAS Arras INRAE » sont disponibles en Annexe 7. Ces analyses montrent que la texture des sols des 4 modalités du dispositif est similaire. Les sols sont composés à 19,5% d'argiles, 49% de limons et 31,5% de sables. Il s'agit de sols classés Limoneux Argilo-Sableux dans le triangle des textures du GEPPA³ de 1963. Les sols ont un pH de 8,0.

La Capacité d'Échange Cationique (CEC) est de l'ordre de 13,5 cmol⁺.kg⁻¹ dans les modalités travaillées T-ref et T-NA et de 18 cmol⁺.kg⁻¹ dans les modalités peu et non travaillées T-NA^{sup} et NT. Les concentrations en calcium, phosphore, potassium et magnésium varient entre les parcelles T-ref et T-NA et les parcelles T-NA^{sup} et NT : les parcelles peu et non travaillées ont des concentrations en éléments nutritifs plus élevées, sauf en potassium. Le NTS, de par le non enfouissement des résidus de culture et l'apport de matière organique (MO) semble responsable d'une accumulation des éléments nutritifs sur les horizons de surface grâce à l'augmentation de la CEC (Pavinato, Rosolem, 2008).

Tableau 4 – Densité apparente et Humidité du sol mesurées en mars 2023. I Breton, 2023

	T-ref	T-NA	T-NA ^{sup}	NT
DA 10 cm (cm ³ .g ⁻¹)	1,36 ± 0,07 a	1,31 ± 0,04 a	1,61 ± 0,06 b	1,56 ± 0,02 b
DA 30 cm (cm ³ .g ⁻¹)	1,47 ± 0,04 a	1,58 ± 0,07 a	1,60 ± 0,01 a	1,56 ± 0,01 a
Humidité du sol (%)	16,24 ± 1,21 a	17,01 ± 0,96 a	22,70 ± 1,47 b	22,78 ± 1,04 b

Les valeurs sont des moyennes (n=5) ± écart-type. Les moyennes associées à des lettres différentes présentent des différences significatives d'après le test paramétrique de comparaisons multiples HSD Tukey (DA 10 cm et Humidité du sol) et Wilcoxon (DA 30cm).
· Différence presque significative pvalue = 0,07. I Breton, 2023

Les sols les plus travaillés T-ref et T-NA ont des densités apparentes (DA) de surface significativement plus faibles que les sols peu ou pas travaillés (Tableau 4). En profondeur, les différences ne sont pas marquées. La p-value du test réalisé sur la densité apparente à 30 cm est de 0,07 : le sol de la modalité T-ref pourrait avoir une densité apparente plus faible en profondeur. Cela s'explique par la prise en masse du sol dans les modalités faiblement travaillées.

³ GEPPA : Groupe d'Étude pour les Problèmes de Pédologie Appliquée

On observe également une différence d'humidité pondérale entre les systèmes. Les systèmes **T-ref** et **T-NA** ont des sols environ 6% moins humides que ceux de **T-NA^{sup}** et **NT**. Conserver l'humidité des sols est un des objectifs de la pratique du NTS. L'humidité est supérieure en sol non travaillé, cela s'explique par la présence de résidus de culture en surface d'une part (Holland, 2004; Peigné *et al.*, 2007) et l'apport de MO d'autre part (Fahmy *et al.*, 2000).

2. Impact du travail du sol sur les indicateurs de qualité des sols Biofunctool®

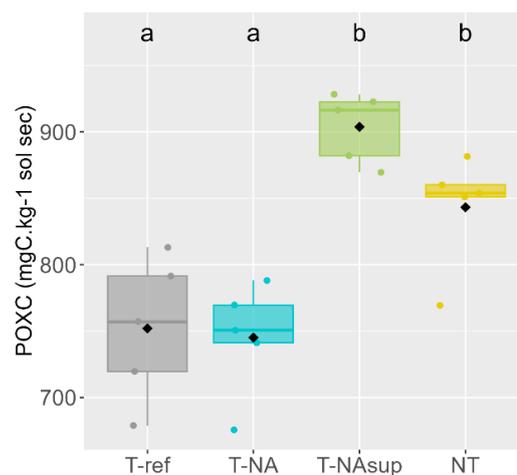
Les premières mesures du dispositif SMART-Sol permettent d'évaluer l'état de santé des sols initial des parcelles. Les valeurs brutes et les résultats des indicateurs Biofunctool® sont en Annexe 8.

a. Dynamique du carbone

La fonction d'un sol « Dynamique du carbone » est évaluée dans la méthode Biofunctool® par la concentration en carbone labile (facilement dégradable) du sol *POXC*, la respiration basale du sol *Situresp* et l'activité de dégradation de substrats carbonés par les organismes du sol *Bait lamina*.

La concentration de carbone labile présente des différences significatives entre les sols des modalités (Figure 12). On note une différence entre les sols faiblement travaillés associés à 200 T.ha⁻¹ de compost et les modalités les plus travaillées avec un faible apport de MO. En effet, **T-NA^{sup}** et **NT** ont des sols plus riches en carbone labile avec des concentrations atteignant respectivement 904 ± 26 et 843 ± 43 mgC.kg⁻¹_{sol sec}. **T-ref** et **T-NA** ont des sols dont la concentration est 14% plus faible, avec des résultats respectifs de 752 ± 54 et 745 ± 43 mgC.kg⁻¹_{sol sec}.

Figure 12 – Concentration en carbone labile des sols (mgC.kg⁻¹ de sol) par modalité. I Breton, 2023



Les modalités ayant une lettre différente présentent des différences significatives d'après le test paramétrique de comparaisons multiples HSD Tukey

L'étude de Bongiorno *et al.*, en 2019 réalisée sur 10 sites expérimentaux européens (principalement grandes cultures) montre un effet de la réduction du travail du sol associée à un apport de MO sur la concentration en carbone labile du sol : les modalités en travail du sol superficiel ou NTS présentent

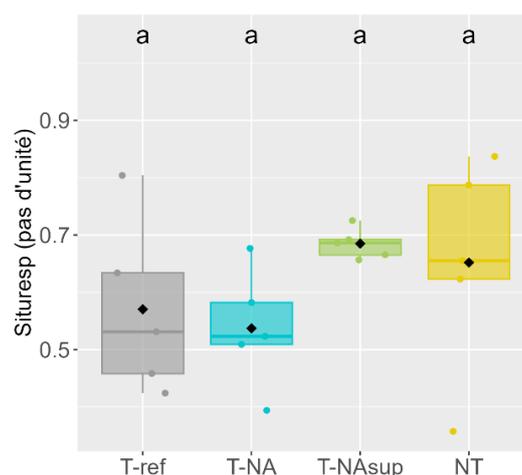
des concentrations en carbone labile supérieure aux modalités travaillées, comme observé ici. Une étude sur des systèmes maraîchers en agriculture biologique de Californie dont tous les sols sont labourés et travaillés de façon identique montre plutôt une corrélation entre la valeur *POXC* et l'apport de compost associé à l'implantation de couverts végétaux (White *et al.*, 2020). La concentration en carbone labile, mesurée sur 0-30 cm de profondeur, est maximale pour des apports de compost et des couverts végétaux annuels. Ainsi, les résultats de *POXC* supérieurs en **T-NA^{sup}** et **NT** peuvent être corrélés à l'apport massif de 200 T.ha⁻¹ de compost datant de 2020. Cela sera à confirmer lors des campagnes de mesures suivantes : les apports de compost du dispositif sont prévus en 2024. L'évolution à long terme du dispositif permettra peut-être d'identifier des phases de séquestration mais aussi des phases de déstockage du carbone dans les systèmes peu/non travaillés comme le suggère l'étude de Dimassi *et al.*, 2014.

La respiration basale (ou microbienne) du sol est traduite par la différence d'absorbance du gel coloré au rouge de Crésol, entre 0 et + 24h d'exposition avec le sol frais. La Figure 14 illustre l'évolution de la couleur du gel, 24h après incubation. Statistiquement, les modalités de travail du sol n'ont pas d'impact significatif sur la respiration basale, les moyennes oscillent entre 0,357 et 0,685 (Figure 13).

Figure 14 – Résultats *Situresp*, les cuves initialement rouge-rose tendent vers du jaune-orange après incubation de 24h. De gauche à droite T-ref, T-NA, T-NA^{sup}, NT. | Breton, 2023



Figure 13 – Respiration basale du sol mesurée par la différence d'absorbance selon les modalités. | Breton, 2023



Les modalités ayant une lettre différente présentent des différences significatives d'après le test non paramétrique de Wilcoxon.

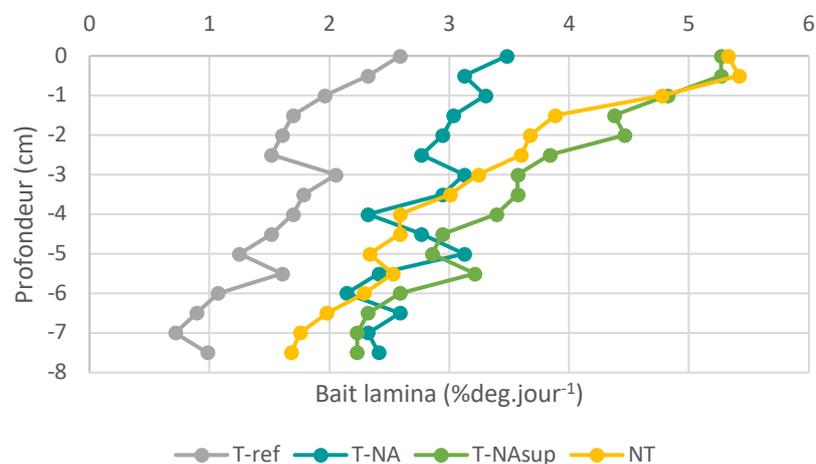
Il est surprenant de n'observer aucune différence statistiquement significative : Vian, en 2009, montre que le non travail impacte très rapidement après sa mise en place (< 5 ans) les micro-organismes du

sol. Une stratification verticale s'installe en systèmes peu et pas travaillés avec une biomasse microbienne supérieure dans les premiers centimètres du sol, entre 0 et 10 cm de profondeur (Vian, 2009). Sur le dispositif SMART-Sol, la mesure est réalisée sur une profondeur similaire : entre 0 et 15 cm. Des différences pourraient donc être observées. A noter, les tests non paramétriques utilisés sur cette variable sont plus sévères que les tests paramétriques, ils conservent souvent l'hypothèse nulle (H_0 : les moyennes ne sont pas significativement différentes). Ici, les moyennes de respiration basale passent tout de même du simple au double entre les modalités **T-NA** et **T-NA^{sup}**. Les campagnes de mesures futures pourront apporter d'autres éclairages sur ces résultats.

La dégradation journalière de substrats carbonés est mesurée sur des languettes plastiques bait lamina. Elle est 2,2 fois plus faible pour les sols de la modalité témoin **T-ref** que pour ceux du système **T-NA^{sup}**. La dégradation respective est de $1,58 \pm 0,94$ %deg.jour⁻¹ versus $3,56 \pm 0,92$ %deg.jour⁻¹. La différence entre les résultats de **T-ref** et de **NT** est presque significative (*p*-value de 0,07). A noter : les comptages de dégradation du substrat sur les bait laminas n'étaient pas randomisés pour les modalités **T-NA^{sup}** et **NT**, cela constitue un biais d'observation pour la notation.

Les bait lamina sont composées de 16 trous : cela permet d'établir un gradient de dégradation du substrat en fonction de la profondeur de sol (0 à 7,5 cm de profondeur). On s'intéresse à la dégradation de chacun des trous (Figure 15). Pour la clarté de la figure, les écart-types ne sont pas représentés, ils sont de l'ordre de 1,1%deg.jour⁻¹. On peut affirmer par validation statistique qu'en surface, la dégradation journalière du substrat carboné est plus importante pour les sols des modalités faiblement travaillées **T-NA^{sup}** et **NT** que pour le sol de la modalité témoin **T-ref** (résultats des tests statistiques en Annexe 9). Au-delà de 3 cm de profondeur, soit à partir du trou n°7, la dégradation journalière du substrat n'est plus significativement différente entre les modalités, elle est de l'ordre de 2,5 %deg.jour⁻¹ à 4 cm de profondeur et de 1,8 %deg.jour⁻¹ à 7cm.

Figure 15 – Dégradation de substrat carboné Bait lamina par modalité en fonction de la profondeur. I Breton, 2023



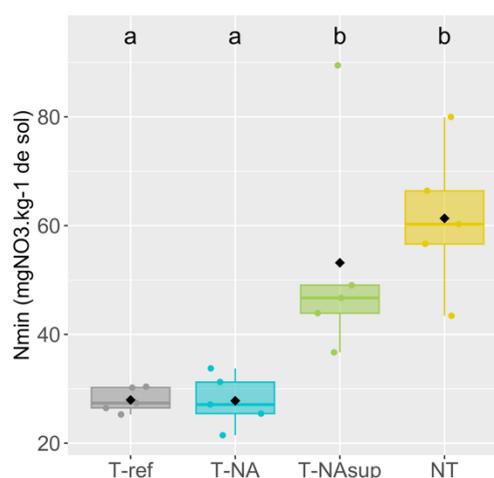
Les résultats présentés suggèrent que les systèmes étudiés ont un effet sur la mésofaune et la petite macrofaune du sol (Brauman, Thoumazeau, 2020) : les systèmes peu voire pas travaillés ont des sols avec potentiellement une plus forte activité de dégradation. D'après Bouthier *et al.*, 2014, cela s'explique par le fait que le non labour, en diminuant les perturbations du sol, permet le développement des décomposeurs du sol notamment en surface. Cela est particulièrement visible en Figure 15. Il y a en revanche une grande diversité de réponses à la perturbation propre à chaque communauté d'organismes du sol (Bouthier *et al.*, 2014). Hamel *et al.*, en 2007, indiquent que le test « bait lamina » cible particulièrement les communautés de collemboles, d'enchytréides et de vers de terre. La plus faible dégradation de substrat carboné en systèmes labourés peut également être due à des conséquences indirectes du travail du sol : ce dernier modifie les propriétés du sol et notamment, comme vu plus haut, l'humidité pondérale qui est plus faible dans les systèmes travaillés. L'humidité est un facteur important, déterminant bien souvent l'activité des organismes du sol présents (Hamel *et al.*, 2007). Pour Hamel *et al.*, les bait laminas sont adaptés à l'étude de l'activité des organismes de surface mais présentent des limites pour les processus de dégradation se déroulant en profondeur.

b. Recyclage des nutriments

La fonction du sol de « Recyclage des nutriments » est évaluée ici par la disponibilité en nitrates dans le sol *Nmin*.

La concentration en nitrates est plus importante dans les systèmes **T-NA^{sup}** et **NT**, elle est deux fois plus élevée que dans les systèmes **T-ref** et **T-NA** (Figure 16). On a respectivement 53 ± 21 et 61 ± 13 $\text{mgNO}_3 \cdot \text{kg}^{-1}_{\text{sol}}$ versus 28 ± 2 et 28 ± 5 $\text{mgNO}_3 \cdot \text{kg}^{-1}_{\text{sol}}$.

Figure 16 – Concentration en nitrates ($\text{mgNO}_3 \cdot \text{kg}^{-1}$ de sol) dans le sol par modalité. I Breton, 2023



Les modalités ayant une lettre différente présentent des différences significatives d'après le test non paramétrique de Wilcoxon.

Comme pour la concentration en carbone labile du sol, la différence de nitrates disponibles est marquée entre les systèmes les plus travaillés et les moins travaillés. Ces résultats sont similaires à ce

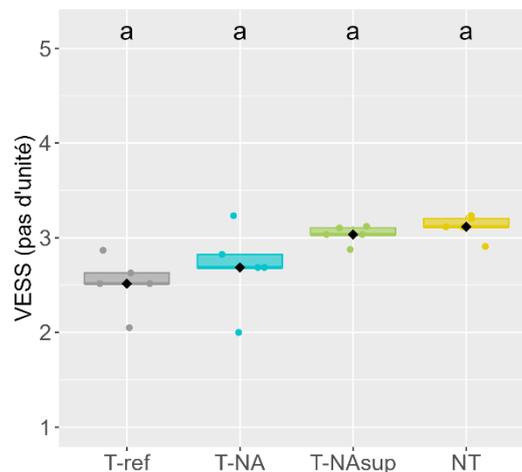
que prouvent d'autres études en grandes cultures. Purakayastha *et al.* montrent en 2009 que la concentration en nitrates est plus élevée sur les 20 premiers centimètres de sol dans des systèmes non travaillés par rapport à des parcelles labourées. Cela est particulièrement vrai lorsque l'arrêt du travail du sol est ancien (28 ans versus 4 ans). Sharifi *et al.*, 2008 observent la même tendance sur les sites dont les sols sont limoneux. Cela souligne alors des risques de pertes par lixiviation, c.à.d. de pertes de nitrates en profondeur. Jackson *et al.*, en 2004 indiquent que les apports de MO permettent de limiter les pertes en profondeur.

c. Maintien de la structure

La fonction d'un sol « Maintien de la structure » est mesurée par les indicateurs Évaluation visuelle de la structure *VESS*, stabilité des agrégats de surface *Ag_Surf* (0-10 cm) et de profondeur *Ag_Prof* (10-25 cm), et vitesse d'infiltration de l'eau dans le sol *Beerkan*.

La Figure 17 montre que les modalités n'ont pas d'impact sur l'évaluation visuelle de la structure *VESS*. Toutefois, le test de Kruskal-Wallis renvoie une p-value inférieure à 0,05 : il y a donc des différences mais celles-ci ne sont pas visibles lors de l'étude des modalités deux à deux par Wilcoxon.

Figure 17 – Évaluation visuelle de la structure par modalité. | Breton, 2023



Les modalités ayant une lettre différente présentent des différences significatives d'après le test non paramétrique de Wilcoxon.

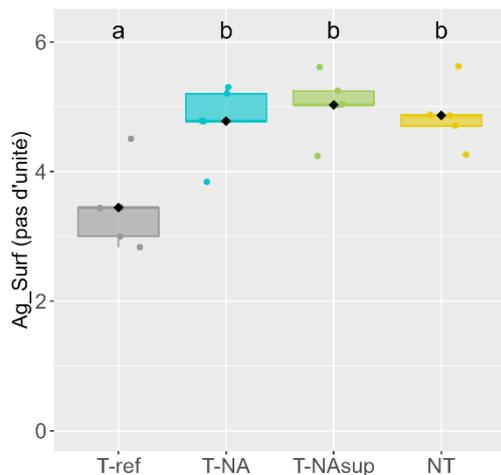
On remarque que la note de $2,51/5 \pm 0,30$ obtenue par la modalité **T-ref** est presque significativement inférieure aux autres modalités (p-value du test de Wilcoxon sur la variable *VESS* de 0,07). **T-ref** obtient la note la plus faible. Or, une note proche de 5 témoigne d'un sol très compact. Cela s'explique par la forte compaction du sol en profondeur (cf densité apparente) dans les modalités peu et pas travaillées.

D'autres études sur des sols limoneux ou sablo-limoneux obtiennent des résultats similaires : la note *VESS* est considérée meilleure en modalité labourée par rapport à un système de culture en semis direct (Abdollahi *et al.*, 2015) ou à un système de prairie pâturée par des bovins (Pulido Moncada *et*

al., 2014). Dans ces deux cas, le sol présente une compaction importante lorsqu'il n'est pas travaillé. On peut parler de prise en masse du sol.

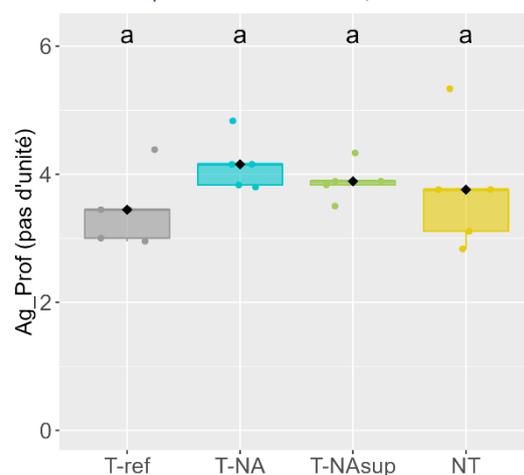
En **T-ref**, les agrégats de surface *Ag_Surf* sont significativement moins stables que dans les trois autres systèmes (Figure 18). Le score sur 6 de cette modalité est de $3,4 \pm 0,7$ contre des scores compris entre 4,8 et 5,0 sur 6 pour les autres. L'indicateur de stabilité des agrégats de sol entre 10 et 25 cm de profondeur *Ag_Prof* ne montre pas de différences significatives entre les modalités (Figure 19). Les moyennes de score sont comprises entre $3,4 \pm 0,6$ en **T-ref** et $4,2 \pm 0,4$ en **T-NA**.

Figure 18 – Stabilité des agrégats de surface (0-10cm) par modalité. | Breton, 2023



Les modalités ayant une lettre différente présentent des différences significatives d'après le test paramétrique de HSD Tukey

Figure 19 – Stabilité des agrégats de profondeur (10-25 cm) par modalité. | Breton, 2023



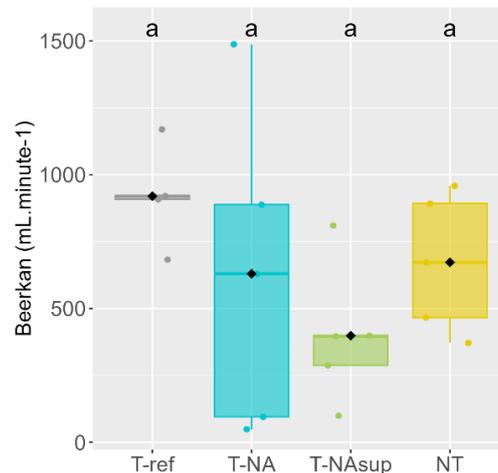
Les modalités ayant une lettre différente présentent des différences significatives d'après le test non paramétrique de Wilcoxon.

L'étude menée par Sekaran *et al.* en 2021 en grandes cultures sur des sols limoneux montre une meilleure stabilité des agrégats des horizons de surface (0-10 cm) en NTS en comparaison avec des systèmes travaillés (labour ou outils non animés). Cela s'explique par la présence de résidus de culture en surface, la plus faible perturbation du sol (Sekaran *et al.*, 2021), et la plus forte concentration de MO en surface (Nouwakpo *et al.*, 2018). Cela favorise les organismes du sols comme les vers de terre, les racines et les communautés microbiennes et donc la formation d'agrégats biologiques (Lavelle *et al.*, 2020). Les systèmes non travaillés depuis plus de 20 ans présentent une stabilité des agrégats plus élevée que pour des systèmes dont l'arrêt du travail du sol date de moins de 7 ans (Sekaran *et al.*, 2021). **NT** étant non travaillé seulement depuis 2019, une différence de stabilité des agrégats de surface avec la modalité **T-NA** s'observera peut-être à plus long terme.

En profondeur, Nouwakpo *et al.* indiquent en 2018 que la stabilité des agrégats suit les mêmes tendances qu'en surface. Toutefois, les différences de moyenne entre les traitements sont nettement plus faibles, comme pour le dispositif SMART-Sol. Blanco-Canqui et Ruis soulignent en 2018 que le travail du sol, même réduit, impacte la stabilité des agrégats sur les 10 premiers cm du profil cultural.

La vitesse d'infiltration de l'eau dans le sol *Beerkan* est très variable au sein même d'une modalité ; les écart-types sont importants (Figure 20). Ils le sont plus particulièrement pour la modalité en travail non animé **T-NA** avec une vitesse d'infiltration de $630 \pm 597 \text{ mL}\cdot\text{minute}^{-1}$. Les modalités de travail du sol associées à des apports de MO n'ont pas d'impact significatif sur la variable *Beerkan*.

Figure 20 – Infiltration de l'eau dans le sol ($\text{mL}\cdot\text{minute}^{-1}$) par modalité. I Breton, 2023



Les modalités ayant une lettre différente présentent des différences significatives d'après le test paramétrique de comparaisons multiples HSD Tukey

L'hétérogénéité entre pseudo répliquas d'une même modalité peut être liée à des différences d'humidité initiale des sols dans chacune des parcelles. En effet, le cycle de culture « Hiver 2022 » à la fin duquel ont été réalisées les mesures présentait un assolement* diversifié : les tests d'infiltration ont été faits sur des sols précédemment couverts de fenouils ou de blettes. S'il n'a pas été montré d'effet culture significatif, cela constitue un premier biais. Aussi, les tests ont été réalisés avec un cylindre PVC de 30 cm de diamètre au lieu de 20 cm, comme préconisé par la méthode.

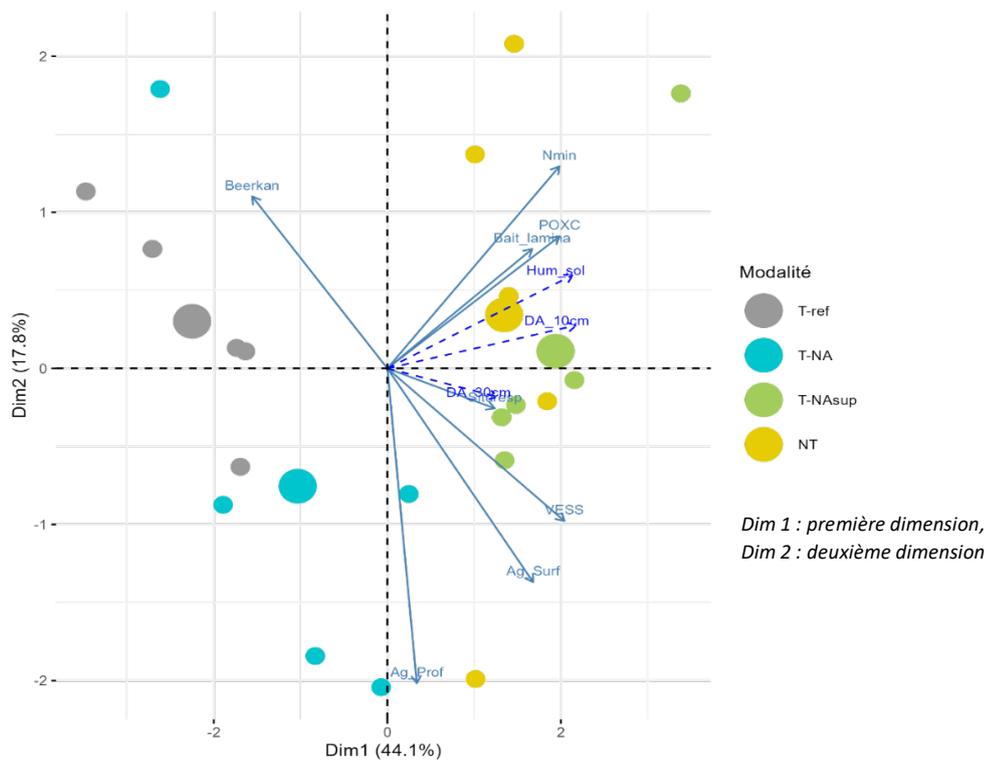
Des mesures de vitesses d'infiltration de l'eau dans le sol ont pu être réalisées par d'autres méthodes dans la littérature (utilisation d'un infiltromètre par exemple). La revue de littérature de Blanco-Canqui et Ruis (2018) indique qu'en grandes cultures et sur plusieurs types de sols, la vitesse d'infiltration de l'eau dans le sol est supérieure en NTS par rapport à des systèmes en travail conventionnel (CT). L'étude de Mitchell *et al.* de 2017 réalisée sur des cultures maraîchères de pleins champs en sols limono-argileux obtient une vitesse d'infiltration 2 fois supérieure en modalité peu travaillée (équivalent de **T-NAsup**) par rapport à un sol très travaillé. Les campagnes de mesures suivantes sur le dispositif SMART-Sol permettront de rediscuter ces résultats.

d. Indice de santé des sols

La Figure 21 présente les résultats de l'ACP. Les données sont expliquées à 62% par les deux premiers axes. Les indicateurs de respiration basale du sol *Situresp*, d'infiltration de l'eau dans le sol

Beerkan et d'activité de dégradation des organismes *Bait lamina* sont les variables les moins bien représentées par ces deux axes.

Figure 21 – Analyse des composantes principales des indicateurs Biofunctool® mesurés en mars 2023. I Breton, 2023



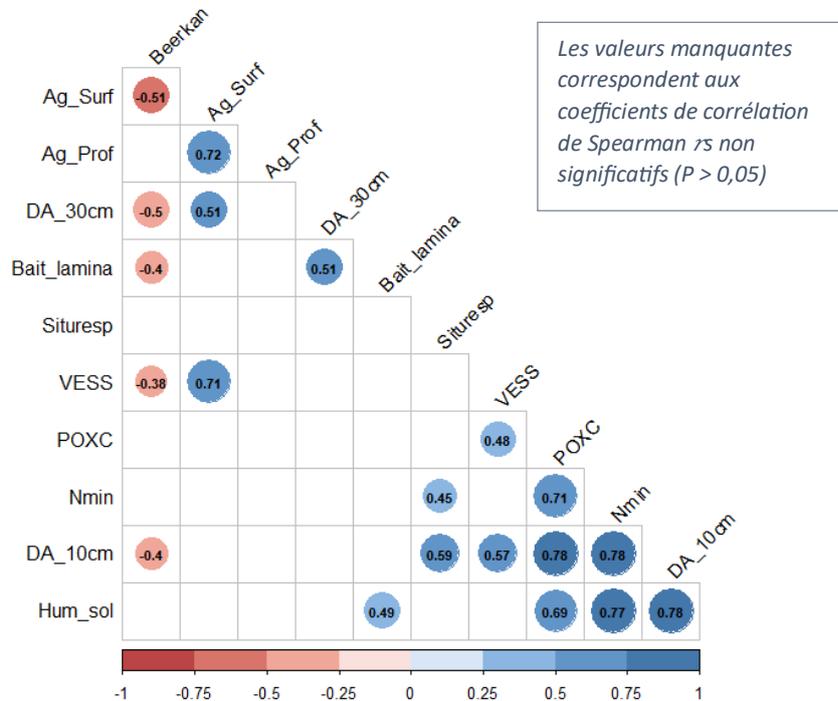
L'axe horizontal de l'ACP est principalement expliqué par les variables *VESS*, *Nmin* et *POXC*. Ainsi, on a sur la moitié droite de la figure les modalités ayant une note d'évaluation visuelle de la structure *VESS* élevée et des concentrations en nitrates *Nmin* et en carbone labile *POXC* les plus importantes. On trouve de ce côté les individus des modalités peu et pas travaillées associées à des apports de MO importants **T-NA^{sup}** et **NT**. L'axe vertical est porté par les variables *Ag_Prof* et *Nmin*. La modalité **T-NA** se situe sur la partie basse de la figure, avec une forte stabilité des agrégats de profondeur *Ag_Prof*.

La Figure 21 montre également que les barycentres des modalités **T-NA^{sup}** et **NT** sont très proches, le faible travail et le NTS affectent pareillement les variables de santé des sols à ce jour.

L'ACP souligne des liens, dits corrélations, entre certaines variables de la méthode Biofunctool®. La matrice des corrélations de la Figure 22 affiche ceux qui sont significatifs. Les variables de vitesse d'infiltration de l'eau dans le sol *Beerkan* et d'évaluation visuelle de la structure *VESS* sont corrélées négativement (coefficient de corrélation de Spearman r_s de - 0,38). On observe que la variable de densité apparente à 30 cm est également corrélée négativement à la variable *Beerkan* (r_s = - 0,5). La densité apparente, variable supplémentaire à la méthode Biofunctool®, permet de mieux comprendre les corrélations entre les variables : lorsque la note *VESS* est élevée, la compaction du sol est importante

ce qui diminue la capacité d'infiltration de l'eau du sol. On observe sur la Figure 21 que la modalité T-ref est moins concernée par les risques de compaction, elle se situe à l'opposé de la flèche VESS.

Figure 22 – Matrice des corrélations ACP. I Breton, 2023



Les indicateurs de concentrations de nitrates *Nmin* et de carbone labile *POXC* sont corrélés positivement ($r_s = 0,71$) ; ces indicateurs sont corrélés à l'humidité du sol *Hum_sol* et à la densité apparente de surface *DA_10cm*. (Figure 21 et 22).

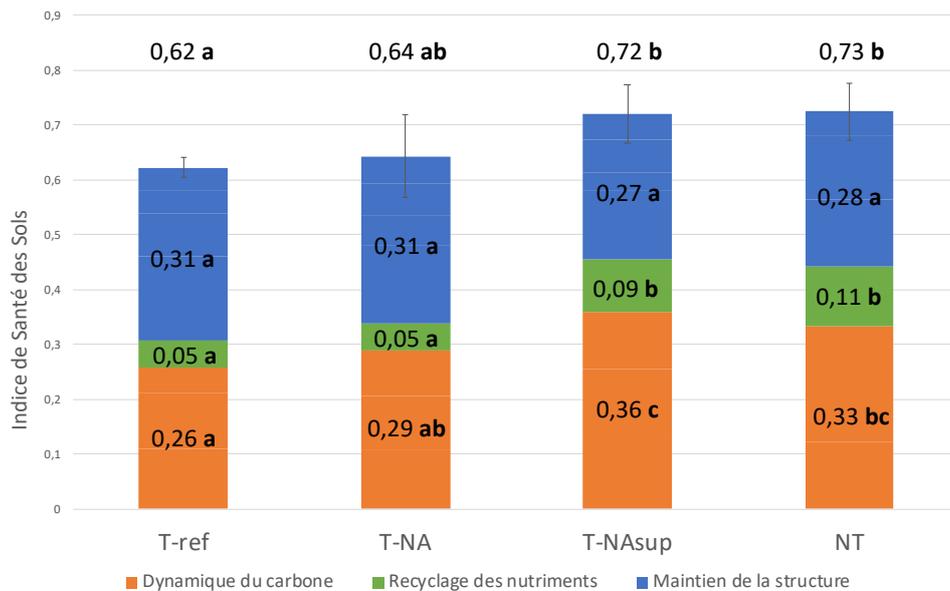
On note que la respiration basale *Situresp* est significativement corrélée à la densité de surface ($r_s = 0,58$) et que la mesure de dégradation de substrat *Bait lamina* est corrélée à l'humidité du sol ($r_s = 0,49$). Cela montre que ces variables sont mal représentées par les deux premiers axes de l'ACP mais qu'elles ont du poids dans les axes suivants.

L'indice de santé des sols (SHI) est construit à partir des données issues de l'ACP, il est borné entre 0 et 1 (Figure 23). Les résultats pour chaque individu sont disponibles en Annexe 10. Les systèmes en travail réduit associé à des apports importants de MO T-NA^{sup} et NT ont les SHI totaux les plus élevés avec des notes de $0,72 \pm 0,05$ et $0,73 \pm 0,05$, respectivement. T-ref a le SHI le plus bas de toutes les modalités, il est de $0,62 \pm 0,02$.

La Figure 23 présente aussi le poids de chaque fonction du sol dans le SHI total. La fonction du sol « Maintien de la structure » n'est pas différente d'une modalité à l'autre. Les fonctions « Recyclage des nutriments » et « Dynamique du carbone » sont celles qui expliquent alors les différences de SHI entre les modalités. En effet, pour ces fonctions, T-NA^{sup} et NT obtiennent des notes significativement supérieures à la modalité T-ref.

Le système travaillé avec des outils non animés **T-NA** a des notes proches de **T-ref** : seule la fonction « **Dynamique du carbone** » semble avoir une note légèrement supérieure. La dispersion des données est plus importante en **T-NA** avec un SHI total de $0,64 \pm 0,07$ contre $0,62 \pm 0,02$ pour **T-ref**. On note également que **T-NA^{sup}** et **NT** ont des SHI très proches : cela s'explique par la similarité des systèmes à ce jour. Cela peut aussi témoigner d'une forte corrélation entre apports de MO et SHI.

Figure 23 – Indice de santé des sols (SHI) de la méthode Biofunctool® par modalités sur le premier cycle cultural du dispositif expérimental SMART-Sol, données mesurées en Mars 2023. I Breton, 2023



Sur le dispositif d'Alénça, le travail du sol est associé à des apports de MO. S'il n'y a pas de référence sur l'association de ces deux facteurs, on trouve toutefois des études sur l'impact de l'un puis de l'autre sur la santé des sols.

En effet, sur des systèmes irrigués de cultures en pleins champs (tomates et coton), dans des conditions arides, Mitchell *et al.* montrent en 2017 un impact de la réduction du travail du sol sur la santé des sols, d'autant plus lorsqu'il est associé à des couverts végétaux. Le point intéressant est que cela ne remet pas en cause les rendements – indicateurs clés pour les bassins de production (Mitchell *et al.*, 2017; Norris, Congreves, 2018). Aussi, dans une méta-analyse de 302 études, Nunes *et al.* indiquent en 2020 que le passage d'un système labouré à un système en NTS améliore sur les 15 premiers cm les résultats d'indicateurs de santé des sols. Cela s'exprime principalement au niveau des indicateurs liés à l'activité biologique, la concentration en carbone labile et la structure du sol. L'amélioration de santé des sols en **NT** s'expliquerait donc par la réduction de la perturbation du sol et l'augmentation des résidus de surface. Au-delà de 25 cm de profondeur, les études ne font pas consensus sur l'impact que pourrait avoir la réduction du travail du sol (Nunes *et al.*, 2020).

Une étude portant sur la comparaison de systèmes maraîchers avec ou sans apport de compost (apport de l'ordre de 30 T par hectare et par an) et dont les indicateurs choisis sont très similaires à ceux dans

la méthode Biofunctool® montre un effet de l'apport de compost sur la santé des sols : le SHI est supérieur pour les modalités avec apport de compost, et ce sur plusieurs cultures – betterave, maïs, pomme de terre et choux de Bruxelles (D'Hose *et al.*, 2014).

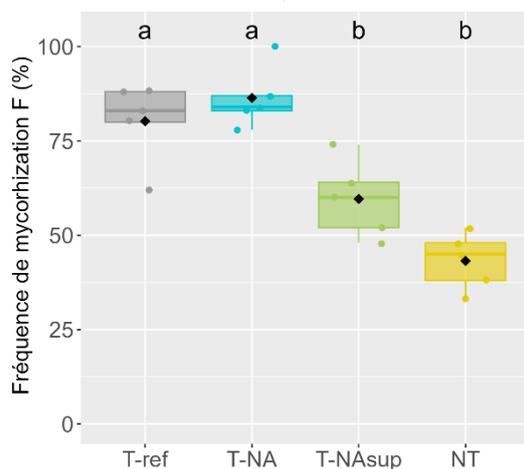
Des références manquent encore afin de pouvoir discuter des SHI : la construction des indices est très variable, avec des choix d'indicateurs différents d'une étude à l'autre. De plus, les modalités de travail du sol sont très variables : la méta-analyse de 2020 de Nunes *et al* ne propose pas de modalité intermédiaire à la modalité « réduction du travail du sol ». Cette dernière englobe à la fois un travail non animé profond et un travail non animé plus superficiel (Nunes *et al.*, 2020). A terme, il sera intéressant de discuter des différences entre **T-NA** et **T-NA^{sup}**. En revanche, **T-NA^{sup}** est à ce jour très proche de **NT**, ce qui s'explique par l'historique similaire de ces parcelles entre 2019 et 2022.

A noter, les auteurs Norris et Congreves soulignent en 2018 que la rotation des cultures impacte très fortement la santé des sols. En maraîchage, il s'agit d'une pratique communément mise en œuvre, particulièrement sur des systèmes en agriculture biologique. Elle n'est donc pas étudiée ici.

e. Vers d'autres indicateurs de santé des sols, les endomycorhizes à arbuscules

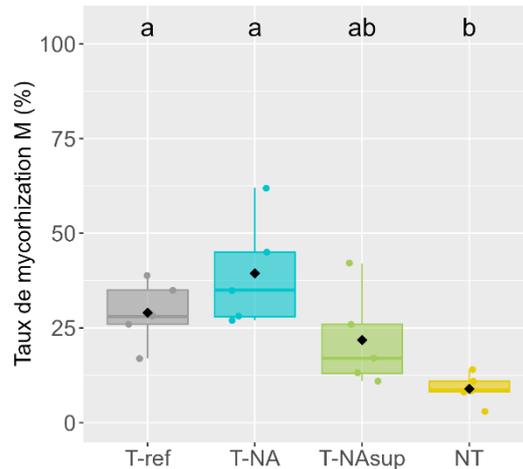
Les endomycorhizes à arbuscules (AMF) sont observées sur des fragments de racines de fenouil. On évalue la fréquence de mycorhization *F* ; le taux de mycorhization *M* ; puis sur les fragments mycorhizés, on s'intéresse aux intensités de mycorhization *m*, d'arbuscules *a* et de vésicules *v*.

Figure 24 – Fréquence de la mycorhization (%) par modalité. I Breton, 2023



Les modalités ayant une lettre différente présentent des différences significatives d'après le test paramétrique de HSD Tukey

Figure 25 – Taux de mycorhization (%) par modalité. I Breton, 2023



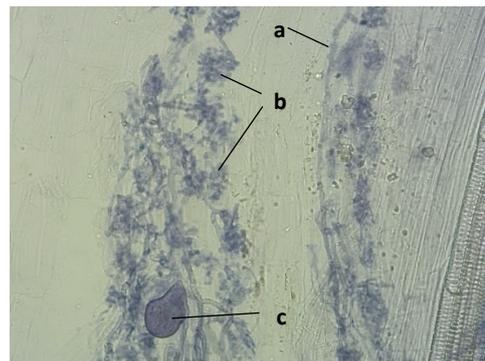
Les modalités ayant une lettre différente présentent des différences significatives d'après le test paramétrique de HSD Tukey

On observe le plus de fragments mycorhizés sur les racines des modalités travaillées **T-ref** et **T-NA** (Figure 24). La fréquence de mycorhization est de $80,2 \pm 10,7$ et $86,4 \pm 8,3\%$, respectivement. Les modalités peu et non travaillées associées à des apports massifs de MO ont des racines dont les fragments sont moins fréquemment mycorhizés : $59,6 \pm 10,2\%$ en **T-NA^{sup}** et $43,2 \pm 7,7\%$ en **NT**. Les

taux de mycorhization M , soit l'intensité globale de la mycorhization, suivent la même tendance : les modalités **T-ref** et **T-NA** ont les taux les plus élevés avec $29,0 \pm 8,5$ et $39,4 \pm 14,5\%$ respectivement (Figure 25). Le système **NT** présente un taux de mycorhization 25% plus faible, de $8,9 \pm 4,1\%$. Lorsque la colonisation mycorhizienne concerne 60 à 80% des racines (fréquence), comme c'est le cas sur les systèmes travaillés, on peut dire que la symbiose est bien installée (Garbaye, 2013).

Les systèmes de travail du sol n'ont pas d'impact à ce jour sur l'intensité de mycorhization m , la présence d'arbuscules a et de vésicules v (Annexe 11). Les fragments mycorhizés sont mycorhizés à environ 35% (en % : $35,6 \pm 7,9$ en **T-ref**, $45,2 \pm 13,4$ en **T-NA**, $35,4 \pm 16,3$ en **T-NA^{sup}**, $20,6 \pm 10,5$ en **NT**). Les arbuscules sont développées à 71% environ dans les parties mycorhizées. Les vésicules sont peu présentes, l'intensité de cette structure est de moins de 10% pour toutes les modalités. De belles observations de chacune des structures ont pu être réalisées, photographiées en Figure 26.

Figure 26 – Structures mycorhiziennes observées en T-NA^{sup}, a : hyphes, b : arbuscules, c : vésicules. I Breton, 2023



Ces derniers indicateurs permettent de décrire la mycorhization. Le développement d'arbuscules témoigne d'échanges de nutriments entre le symbiote et la plante hôte (Bagyaraj, 2014). Les vésicules sont des organes contenant des composés lipidiques, probablement ayant un rôle de stockage, et dont la présence témoigne d'une vigueur de la plante hôte (Garbaye, 2013). Certaines espèces d'AMF n'en forment toutefois jamais. Ici, on remarque que le travail du sol associé à des apports de MO n'impacte pas le développement des structures secondaires de l'endomycorhize. Les modalités étudiées impactent principalement la présence ou non d'endomycorhizes dans le système racinaire de la plante.

Lors des observations, il a été identifié des structures spécifiques de l'endophyte *Glomus tenue*, considéré aujourd'hui comme un organisme distinct des AMF (Orchard *et al.*, 2017; Sinanaj *et al.*, 2021). Cet endophyte n'a donc pas été pris en compte dans les comptages. En revanche, il a été noté une plus forte présence de *Glomus tenue* dans les modalités les plus fortement travaillées **T-ref** et **T-NA** avec 18 observations par modalité pour seulement 3 à 4 en **T-NA^{sup}** et **NT**. Une revue de littérature synthétisant 108 articles indique que *Glomus tenue* est souvent présent dans les mêmes proportions que les AMF en sols agricoles (Orchard *et al.*, 2017). Certaines études semblent montrer des échanges de phosphore et de nitrogènes entre cet endophyte et la plante hôte. Des recherches supplémentaires pour comprendre son rôle sont nécessaires (Orchard *et al.*, 2017; Sinanaj *et al.*, 2021).

Il est surprenant de constater que les systèmes en travail du sol réduit présentent peu de mycorhization. Dans une étude en grandes cultures sur sols limoneux utilisant la méthode de

séquençage Métabarcoding, les taux de colonisation racinaire du maïs sont supérieurs en modalité non travaillée avec installation de couverts végétaux par rapport à la modalité labourée. La richesse spécifique et la densité de spores sont aussi supérieures en NTS (Séjalon-Delmas, Bécard, 2021). Une seconde étude suggère que les AMF sont affectées par les perturbations mécaniques du sol, la biomasse mycorhizienne est 40 à 60% plus élevée en NTS (Helgason *et al.*, 2010). Les résultats obtenus ici peuvent alors être expliqués par la forte densité des sols peu et pas travaillés : la densité peut altérer l'établissement de symbioses mycorhiziennes (Jansa *et al.*, 2006).

Aussi, une limite de la méthode est identifiée. Les endomycorhizes à arbuscules regroupent de nombreux genres. La méthode d'observation utilisée ne permet pas de connaître précisément les espèces présentes. La biologie moléculaire et la génétique permettraient, elles, d'identifier précisément les espèces mycorhiziennes présentes dans chaque système, limitant les risques d'erreur de comptage. Il faudrait procéder à des séquençages d'ADN et les comparer à des bases de données contenant des séquences génétiques d'espèces connues (Garbaye, 2013).

IV. Performance agronomique

1. Reprise des plants, 20 jours après plantation

Les mesures de biomasse végétale de la plante entière réalisées 20 jours après la plantation sont présentées dans le Tableau 5.

Tableau 5 – Résultats des indicateurs de reprise par modalité et résultats de l'ANOVA. I Breton, 2023

Indicateurs	T-ref	T-NA	T-NA ^{sup}	NT	P-value P
Humidité pondérale (%)	768 ± 28 a	579 ± 155 a	678 ± 71 a	667 ± 78 a	0.0351*
Biomasse sèche (g)	10,6 ± 1,4 a	8,4 ± 1,5 a	8,3 ± 1,0 a	10,9 ± 2,8 a	0,066 ·

Les valeurs par modalité sont des moyennes (n=5) ± écart-type. Les moyennes associées à des lettres différentes présentent des différences significatives d'après le test paramétrique de comparaisons multiples HSD Tukey ou le test non paramétrique de Wilcoxon.

* Différence significative $P < 0,05$; · Différence presque significative $0,05 < P < 0,1$.

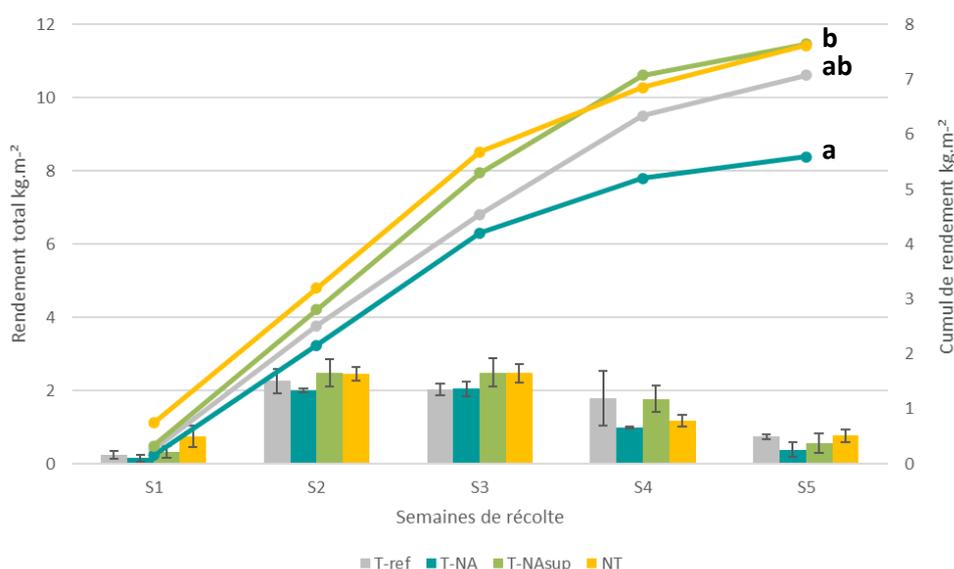
La biomasse végétale 20 jours post plantation présente des humidités pondérales différentes. Ces différences ne peuvent toutefois pas être décrites (non-significativité des comparaisons de modalités deux à deux par le test de Wilcoxon). La biomasse sèche pesée n'est pas différente entre les modalités. La p-value est proche du seuil de significativité fixé à 0,05 : les biomasses sèches des modalités T-ref et NT pourraient être plus élevées que celles des autres modalités. De même, l'humidité pondérale des plantes de la modalité T-ref semble plus élevée.

A noter, visuellement, les plants semblent avoir plus de difficulté de croissance (feuilles semblent plus sèches et plus petites) en T-ref et T-NA à cette date. Cela ne se retrouve pas dans les valeurs mesurées.

2. Rendements de biomasse de fruits

Les rendements totaux hebdomadaires (basés sur les biomasses de fruits commercialisables ou non) et les cumuls de rendements sur l'ensemble de la durée de récolte sont présentés pour chaque modalité sur la Figure 27, le tableau des valeurs par modalité est proposé en Annexe 12. Les rendements sont présentés en kg.m^{-2} .

Figure 27 – Moyenne de rendement total par semaine (n=3) avec écart-type (histogramme) et cumuls de rendement par modalité (courbe). I Breton, 2023



Deux récoltes pour la première semaine S1 et 3 récoltes par semaine ensuite. Les cumuls totaux d'une modalité suivis par la même lettre ne sont pas significativement différents d'après le test paramétrique de comparaisons multiples HSD Tukey.

La première semaine de récolte, le rendement de la modalité non travaillée NT est de $0,8 \pm 0,3 \text{ kg.m}^{-2}$, significativement supérieur aux modalités travaillées en profondeur associées à de faibles apports de MO T-NA et T-ref. Ces dernières ont des premiers rendements totaux respectifs de $0,16 \pm 0,09$ et $0,25 \pm 0,11 \text{ kg.m}^{-2}$. Cela montre une précocité de production de fruits en NT. Les plantes de cette modalité ne rencontrent pas de difficulté à se développer, il y a moins de mortalité. Il semble que cela provienne d'une meilleure alimentation hydrique expliquée par le remplissage de la réserve utilisable du sol en amont de la plantation (apport d'eau de 45 mm).

En fin de récolte (semaine 5), les systèmes associés à un apport de 200 T.ha^{-1} de compost T-NA sup et NT présentent les rendements les plus importants, $7,6 \pm 0,8$ et $7,6 \pm 0,4 \text{ kg.m}^{-2}$ respectivement. En système avec travail du sol non animé T-NA, le rendement atteint en fin de cycle est le plus faible : de l'ordre de 2 kg.m^{-2} de moins que les modalités T-NA sup et NT. Le système de référence T-ref se positionne quant à lui sur des valeurs de cumuls de rendement intermédiaire de $7,1 \pm 0,7 \text{ kg.m}^{-2}$.

La limite souvent mise en avant avec l'arrêt du travail du sol est la perte de rendement qui lui est associée les premières années – compaction du sol, communautés biologiques non installées, problème de disponibilité en nutriments et manque de connaissances (Soane *et al.*, 2012). On remarque ici que l'arrêt du travail du sol associé à des apports massifs de MO ne présente plus à ce jour de perte de rendement : les rendements sont au moins égaux à ceux des systèmes travaillés. Les apports massifs de MO sur des systèmes maraîchers pourraient même permettre une augmentation des rendements expliquée par la meilleure nutrition minérale des plantes et l'amélioration des propriétés du milieu à long terme, comme l'humidité du sol (Norris, Congreves, 2018). L'implantation de couverts végétaux est aussi une pratique dite « alternative » aux systèmes maraîchers conventionnels et référencée par Norris et Congreves en 2018 comme ayant des impacts sur le rendement. Un couvert végétal peut avoir un effet positif sur le rendement s'il ne repousse pas la date d'implantation de la culture suivante et qu'un temps de première décomposition avant cette implantation est possible (Norris, Congreves, 2018). Des couverts seront implantés sur le dispositif, pour toutes les modalités, mais cette pratique n'est pas encore prise en compte.

Les résultats de rendement ne sont pas comparables avec des références : le cycle de la culture a été particulièrement court à cause d'une infestation de ravageurs dans les 4 modalités. La culture a alors été arrachée deux semaines avant la fin de cycle cultural prévue. Le développement de pucerons et d'acariens a été favorisé par les fortes chaleurs en début de cycle qui ont empêché le bon développement des auxiliaires des cultures et la mise en place de la lutte biologique. Les populations de ravageurs se sont généralisées dans les modalités **T-NA^{sup}** et **NT** une à deux semaines plus tard que dans les autres modalités. Toutefois la présence de ces ravageurs, avec en plus de l'oïdium (maladie cryptogamique affectant la feuille), est généralisée en fin de cycle dans toutes les modalités. Les récoltes manuelles ont pu entraîner des transferts de ravageurs d'une modalité à l'autre (gants, vêtements, chariots de récolte). Avec un tel état sanitaire, la méthode de mesure du rendement est questionnée : dans certains tunnels maraîchers, les ZAD Agronomiques sont précocement très touchées par les acariens (en **T-NA**) ou en pucerons (en **NT**). Le développement d'un foyer de ravageurs est constaté, non représentatif du reste du tunnel. Ainsi, le plus faible rendement observé en **T-NA** peut être lié à l'infestation de ravageurs sur une puis deux ZAD.

Les rendements sont divisés en deux catégories : le rendement commercial et le rendement non commercial (déchets). Le taux de non-commercialisation est étudié (Annexe 12), celui-ci est similaire pour tous les systèmes. La part de rendement non commercial relative au rendement total d'une modalité donnée permet de discuter de la qualité de la production d'un point de vue agronomique. Il n'y a ici pas de différence significative en termes de qualité.

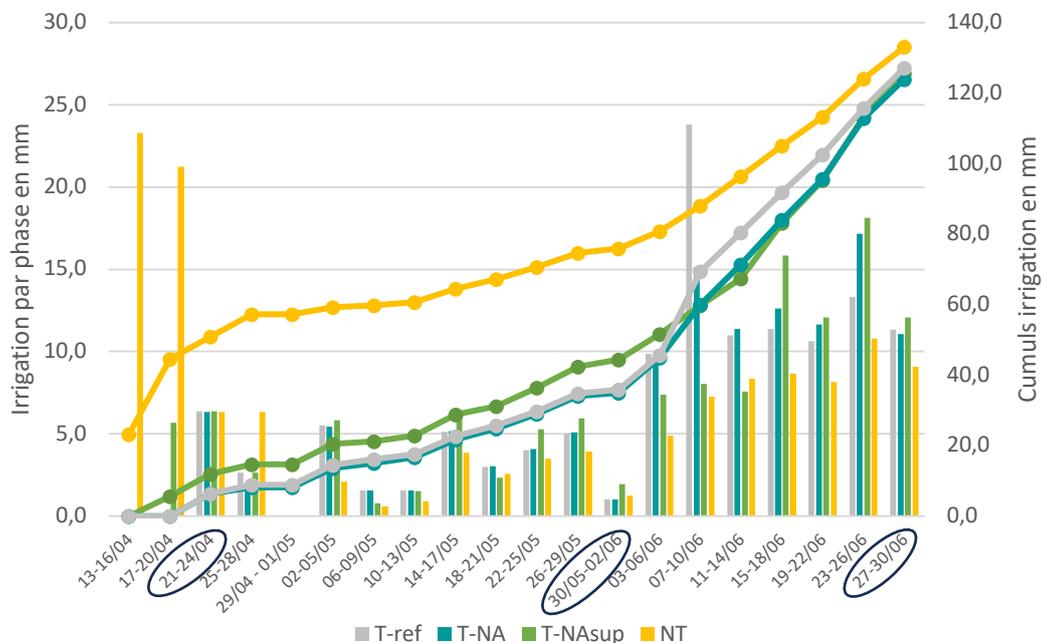
Remarque : le rendement en pièce par m² peut aussi être intéressant sur un légume vendu à l'unité comme le concombre. En revanche, l'analyse des poids moyens d'une pièce montre qu'il n'y a pas de différence significative entre les modalités (p-value < 0,05). Les tendances d'une modalité observées sur les rendements en kg.m⁻² sont donc les mêmes pour le rendement en unité.m⁻².

V. Efficience de l'irrigation

1. Cumuls d'irrigation

Les apports d'irrigation sur un intervalle de 4 jours et les cumuls d'irrigation par modalités sont présentés sur la Figure 28. Le suivi de l'irrigation se fait uniquement à l'échelle d'un tunnel c.à.d. d'une modalité. Trois points du cycle de la culture sont particulièrement intéressants et comparés : la plantation, la première récolte et la fin de cycle – ces dates sont entourées sur la figure.

Figure 28 – Irrigation et cumuls d'irrigation par modalité (intervalle de 4 jours). I Breton, 2023



Au moment de la plantation, des écarts sont déjà marqués entre les tunnels puisque la modalité non travaillée **NT** a reçu 44,5 mm d'eau afin de permettre la plantation. Cet apport fractionné en 6 fois apporte en moyenne 7,4 mm.jour⁻¹. En **T-NA sup**, une irrigation de 5,7 mm est apportée avant la plantation. Les autres modalités n'ont pas reçu d'apports d'eau avant le 21 avril – date de la plantation.

A la première récolte, **NT** reste la modalité la plus irriguée avec un cumul d'apport d'eau de 74,6 mm. Les modalités **T-ref**, **T-NA**, **T-NA sup** ont reçu à cette date respectivement 34,8 et 34,0 et 42,4 mm d'eau.

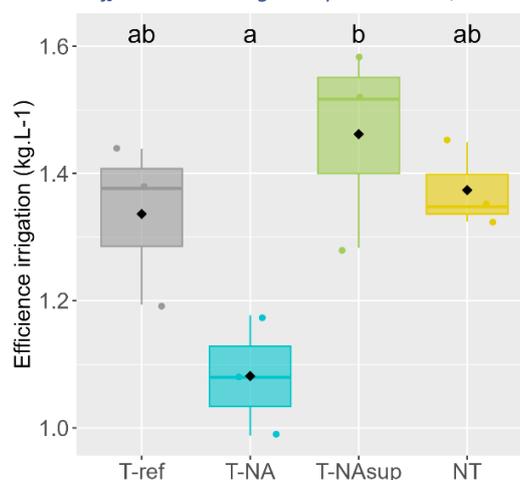
Au 30 juin, soit à l'arrêt des mesures faites sur le cycle de culture « Été 2023 », les cumuls totaux d'irrigation sont similaires entre les modalités. Les apports d'eau totaux sont les suivants : 127 mm en **T-ref**, 124 mm en **T-NA**, 126 mm en **T-NA sup**, 133 mm en **NT**.

Ainsi, tous les systèmes ont finalement consommé une quantité d'eau similaire. Si la modalité non travaillée a reçu au départ un apport d'eau conséquent, cela a bénéficié à la culture lors de la phase d'implantation et n'a pas entraîné une consommation d'eau plus importante que dans les autres systèmes (6% d'écart seulement entre **T-NA^{sup}** et **NT**). A ce stade, il est intéressant de noter que l'utilisation de l'eau en **NT** est répartie différemment dans le temps : les apports d'eau en début de cycle sont faits au printemps lorsque la ressource est la plus disponible. La pression sur la ressource est ainsi plus étalée à l'échelle de l'exploitation et le système est plus résilient. Toutefois, cet apport d'eau en début de cycle nécessite un sol dont les propriétés permettent de retenir et stocker l'eau. La MO est en partie responsable de la capacité de rétention d'eau d'un sol mais, bien que longtemps mise en avant comme étant le facteur principal, il semble que cela soit limité et que la texture du sol soit notamment un critère particulièrement important (Minasny, McBratney, 2018; Libohova *et al.*, 2018).

2. Efficience de l'eau

La consommation d'eau d'un système est rapportée à son rendement total par l'indicateur d'efficience de l'irrigation. Le cumul d'eau est ramené à 12 plants afin d'être comparable avec les valeurs de rendements mesurés. Les résultats par individus sont disponibles en Annexe 13.

Figure 29 – Efficience de l'irrigation par modalité, I Breton 2023



Les cumuls totaux d'une modalité suivis par la même lettre ne sont pas significativement différents d'après le test paramétrique de comparaisons multiples HSD Tukey

Le système en travail non animé **T-NA** correspond à la modalité la moins efficiente avec 1,08 kg de concombres produit par litre d'eau en moyenne (Figure 29). A l'inverse, la modalité associée à un travail superficiel **T-NA^{sup}** est la plus efficiente en eau avec $1,46 \pm 0,16$ kg.L⁻¹. On note une plus grosse variabilité de l'efficience de l'irrigation dans cette modalité, liée à la variabilité des rendements. Les systèmes associés aux pratiques les plus extrêmes du dispositif tant en terme de travail du sol que d'apport de MO présentent une efficience de l'eau intermédiaire et similaire de l'ordre de 1,35 kg.L⁻¹.

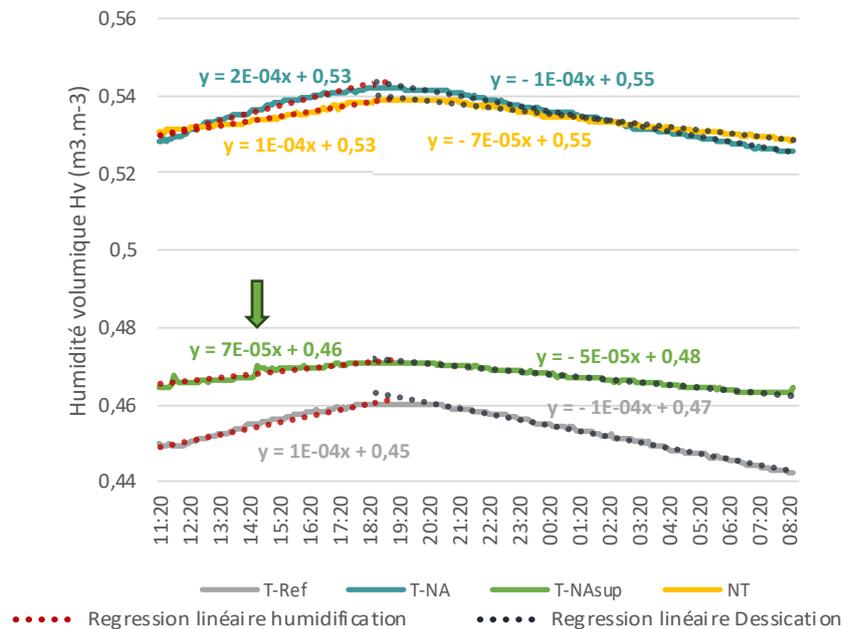
L'efficacité de l'irrigation est un indicateur témoignant de la performance hydrique du système qui permet de relativiser la valeur d'apport d'eau et de le mettre en relation avec la production du système donné. **T-NA^{sup}** semble être la modalité la plus efficace en eau.

3. L'eau dans le sol

L'humidité volumique du sol est mesurée par les sondes TDR. Une première exploration des données est proposée ici. De plus amples traitements seront réalisés *a posteriori* avec des répétitions sur plusieurs périodes clés et une correction des données après la calibration des sondes TDR.

La Figure 30 présente l'humidification puis l'assèchement du sol à la suite d'une irrigation. Celle-ci est réalisée le 17/05 pour les 4 modalités. Les courbes correspondent à une moyenne de points de mesures des 3 sondes TDR placées à 10 cm de profondeur, pour de mesures toutes les 5 minutes. On considère les irrigations reçues en même temps pour les 4 systèmes (entre 11h20 et 12h20). Les quantités d'eau sont variables entre les modalités car les apports sont calculés, on le rappelle, en fonction des coefficients culturaux K_c propres à chaque système. Les apports sont de 214 L pour **T-ref**, 215 L pour **T-NA**, 248 L fractionnés en deux apports (à 11h45 puis à 14h30, cf flèche verte) pour **T-NA^{sup}**, 182 L pour **NT**. L'irrigation suivante démarre le 18 mai à environ 8h pour toutes les modalités.

Figure 30 – Humidité volumique des sols après l'irrigation du 17 mai mesurée à 10 cm de profondeur. I Breton, 2023



Les courbes linéaires tracées en pointillés permettent de discuter de la pente qui traduit des vitesses d'humidification et d'assèchement – coefficients directeurs a des droites $y = ax + b$ (Figure 30) – et donc de leur vitesse respective. La modalité faiblement travaillée associée à un apport massif de MO **T-NA^{sup}** présente un sol dont la vitesse d'humidification et de dessiccation est lente, les coefficients directeurs d'humidification et d'assèchement sont de l'ordre de 6.10^{-5} . Ce sol tamponne le plus l'apport

d'eau : la différence entre le pic d'humidité ($h_v = 0,47 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$) et le retour à l'état initial ($h_v = 0,46 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$) est faible. Les sols se desséchant le plus rapidement sont ceux des systèmes **T-ref** et **T-NA**, dont le coefficient directeur d'assèchement est de -10^{-4} .

La vitesse d'infiltration, discutée précédemment dans la partie sur les tests Beerkan, est plus rapide en systèmes non travaillés (Blanco-Canqui, Ruis, 2018; Mitchell *et al.*, 2017). Il est donc étonnant de mesurer une plus faible vitesse d'humidification en **T-NA^{sup}** et **NT** par rapport aux systèmes travaillés **T-ref** et **T-NA**. Les apports de MO jouent probablement un rôle dans la diffusion de l'eau dans le sol et dans la conservation de celle-ci. Il est intéressant de noter la capacité du sol des systèmes **T-NA^{sup}** et **NT** à tamponner les apports d'eau : ce pouvoir tampon peut permettre aux systèmes d'être plus résilients et de se dessécher moins rapidement. Cela assurerait alors une meilleure alimentation hydrique de la culture, facteur très important dans le cas de sécheresse.

Quelques remarques peuvent être ajoutées à ce stade. Tout d'abord, la valeur absolue d'humidité volumique est surestimée et ne peut être discutée car la calibration des sondes n'est pas encore complète. Les sols des modalités **T-NA^{sup}** et **NT** ont une densité apparente supérieure à $1,55 \text{ cm}^3 \cdot \text{g}^{-1}$ et les sondes sont alors à calibrer plus finement que la calibration proposée par le constructeur (Delalande *et al.*, 2017). Plusieurs mesures d'humidité volumique par des pesées en laboratoire avant et après passage à l'étuve sont à réaliser afin de corriger les valeurs obtenues en continu par les sondes. Trois moments sont à *minima* repérés : avant, après et entre deux arrosages. De plus, la comparaison d'humidité volumique est difficile entre les modalités puisque ces dernières ne reçoivent pas l'eau en même temps. Cela s'explique par les besoins en eau différents en fonction des systèmes (déterminés par les coefficients culturaux) et par le système d'irrigation lui-même. L'irrigation se fait en réseau, 8 tunnels maraîchers sont sur le même réseau. Un tunnel à la fois peut être irrigué, une liste d'attente se crée lorsqu'un autre tunnel dépasse le seuil d'ETP déclenchant son arrosage. Le 17/05 a été choisi car à cette date, les irrigations des 4 modalités sont rapprochées dans le temps. Enfin, les sondes TDR situées à 30 cm de profondeur ne sont pas exploitées ici. Aucune variabilité d'humidité volumique est mesurée à cette date. Les plants de concombres sont encore relativement petits mi-mai, on peut supposer que les racines seraient localisées en surface ce qui expliquerait un assèchement plus important jusqu'à 10 cm.

Le potentiel hydrique est mesuré toutes les 4 heures par les sondes Watermark. Les valeurs obtenues le 17 mai ne sont pas corrélées avec celles des TDR mais elles sont difficilement exploitables (forts écart-types, Annexe 14). Ces résultats pourront être comparés plus amplement à l'avenir : depuis la mi-juin, les Watermark effectuent une mesure toutes les 5 minutes, comme les TDR.

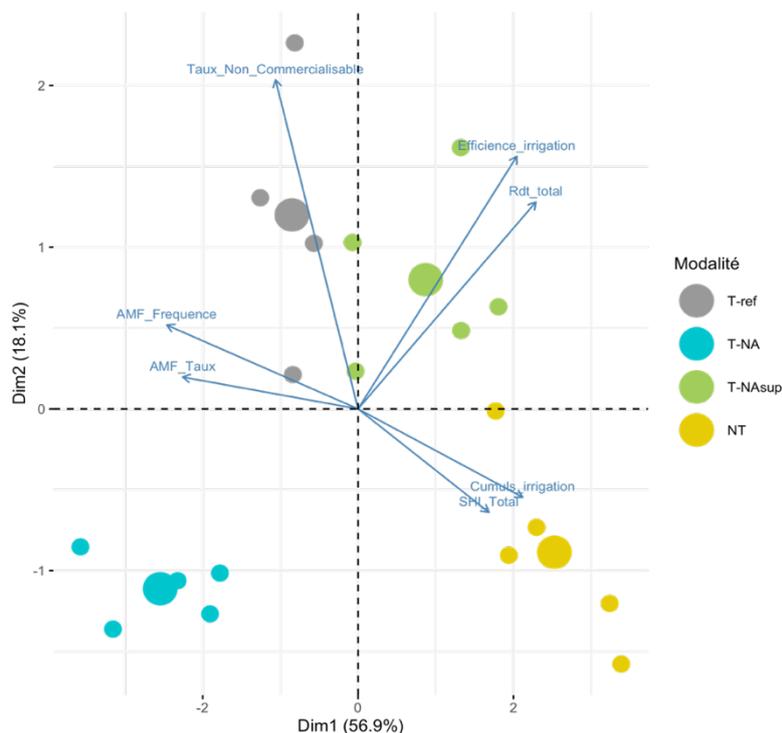
VI. Évaluation multicritère

Pour une vision plus globale de la performance des 4 systèmes, la santé des sols est mise en relation avec les rendements et l'efficacité de l'irrigation. Une analyse multivariée est proposée ici.

Bien qu'il s'agisse encore du début de la différenciation, les systèmes étudiés sont séparés et répartis de part et d'autre des axes (Figure 31). Sur la partie gauche, on trouve les systèmes associés à de faibles apports de MO et un travail du sol relativement profond **T-ref** et **T-NA**. A droite, sont positionnés les deux systèmes peu et non travaillés sur lesquels de forts apports de MO ont été réalisés **T-NAsup** et **NT**. Ces deux systèmes sont les plus performants du point de vue de la santé des sols (SHI élevé), de la performance agronomique (rendement important) et de l'efficacité de l'irrigation. Le rendement total et l'efficacité de l'irrigation sont corrélés : les systèmes les plus efficaces au regard de l'irrigation ont aussi les plus hauts rendements. L'efficacité de l'irrigation n'a donc pas d'effet négatif sur la production.

T-ref et **T-NA** ont un taux de rendement non commercialisable le plus élevé. Pour ces modalités, le taux et la fréquence de mycorhization sont aussi les plus élevés.

Figure 31 – Analyse des composantes principales des indicateurs santé des sols, agronomiques et hydriques sur la culture été 2023.1 Breton, 2023



On note une corrélation négative entre le SHI et les indicateurs relatifs aux AMF : les systèmes avec le plus d'AMF à ce jour ne sont pas les plus performants en termes de santé des sols selon l'indice calculé à partir de la méthode Biofunctool®. Une hypothèse peut être avancée : les plantes des systèmes dont le SHI est plus élevé **T-NAsup** et **NT** auraient un accès à plus de nutriments. Cela s'expliquerait par les apports de MO, ayant un effet positif sur la CEC, et par la minéralisation réalisée par les organismes du

sol. Les plantes auraient alors un intérêt moindre à développer des symbioses avec des endomycorhizes à arbuscules. Les AMF sembleraient aussi négativement affectées par la prise en masse du sol liée à l'arrêt du travail de celui-ci (cf DA de ces systèmes).

En conditions de restriction de l'usage de l'eau par arrêtés préfectoraux comme ce fut le cas cette année, les systèmes peu et pas travaillés associés à des apports importants de MO permettent une meilleure production agricole tout en conservant la santé des sols. Ces systèmes sont alors plus résilients et en capacité de tamponner les conditions extrêmes d'humidité. On note que dans le système non travaillé **NT**, la plantation est rendue difficile par la forte compaction du sol. De ce point de vue, **T-NA^{sup}** semble être un bon compromis entre santé des sols, performance agronomique, efficience de l'irrigation et faisabilité technique. Un travail du sol superficiel facilite l'implantation des racines dans le sol sans compromettre la structure de celui-ci.

VII. Discussion générale

1. Le dispositif expérimental présente certaines limites connues

L'effet des facteurs *travail du sol* et *apport de matière organique* du dispositif SMART-Sol ne peut être mesuré individuellement. Ce choix est fait dans l'objectif d'avoir une approche systémique avec un nombre limité de tunnels maraîchers et de moyens financiers. Pour aller plus loin dans la compréhension des processus édaphiques* liés à ces pratiques, installer 4 tunnels supplémentaires pourrait être intéressant. Dans ce cas, les systèmes croisés non étudiés seraient mis en place comme : une modalité en travail du sol usuel associé à des apports massifs de MO, une modalité en NTS couplé à des apports usuels de MO. Il serait ainsi possible de connaître le facteur ayant le plus d'impacts sur les résultats et de nuancer ces derniers. Des leviers pour améliorer la performance des systèmes fonctions des ressources disponibles pourraient alors être proposés. En revanche, un plan expérimental en bloc aléatoire complet n'est pas envisageable : un tel plan nécessite de mettre en place des tunnels entiers en guise de répliquas. Cela est démesuré par rapport à la dimension du dispositif.

Pour limiter l'hétérogénéité spatiale au sein d'une modalité, les espèces implantées seront toujours monospécifiques sur les 6 rangs centraux des tunnels (rangs du dispositif expérimental). En effet, cette première campagne de mesures Biofunctool® réalisée à la fin du cycle d'hiver (fenouil et blettes implantées) a montré l'importance d'avoir une homogénéité entre les ZAD. Plus particulièrement, le test d'infiltration de l'eau *Beerkan* serait à effectuer sur un sol aux humidités initiales similaires, pour éviter tout biais de mesure, et donc sur des cultures similaires ayant reçu les mêmes doses d'irrigations.

Le choix de l'implantation du melon en bordure de tunnels (hors dispositif expérimental) a permis d'avoir une culture de la même famille que le concombre et de faciliter les choix de rotation par la suite.

En revanche, ce choix a aussi présenté quelques limites. Les plants de melons se développent près du sol. Les fruits sont sensibles à l'humidité avec un risque de développement de moisissures pouvant affecter le rendement. La présence de cette culture en bordure de tunnel sur le premier cycle cultural du dispositif n'a alors pas permis d'apporter de l'eau par aspersion. Or, ces apports d'eau auraient été bénéfiques aux plants de concombres en abaissant la température ambiante des tunnels et réduisant la pression des acariens et pucerons. En effet, les auxiliaires lâchés dans les tunnels (lutte biologique) comme l'acarien prédateur *A. swirskii* sont actifs pour des températures inférieures à 35°C, avec une température létale au-delà de 40°C. Les fortes chaleurs en début de cycle cultural ont affecté ces populations limitant la mise en place de la lutte biologique. Par conséquent, une forte pression des ravageurs a affecté la culture de concombres. On notera alors que la culture implantée en bordure de tunnel doit être compatible avec l'espèce présente sur les rangs du dispositif en considérant aussi bien les conditions climatiques qu'elle crée (ombrage, humidité), la gestion des ravageurs de culture et la rotation. Il est déjà prévu sur les prochains cycles que la culture en bordure soit identique à celle des rangs centraux ou compatible avec les pratiques et leviers envisagés sur les rangs du dispositif.

Sur ce dispositif, un apport d'eau est prévu en amont de la plantation quand cela est nécessaire pour : ramollir le sol et permettre la plantation dans le cas de non-travail et faciliter le passage des outils de travail dans les autres systèmes. Cet apport est piloté avec les mêmes règles de décision pour toutes les modalités, à dire d'experts. En revanche, il n'y a pas encore beaucoup de recul dans l'unité sur l'apport d'eau nécessaire en NTS. Il se peut que les quantités aient été surestimées cette année, allant au-delà du besoin en eau strictement nécessaire pour ramollir le sol. Cet apport, en remplissant la réserve utile du sol, semble avoir permis à la culture de bien s'implanter et de ne pas trop souffrir des fortes chaleurs du début de cycle. Cela peut être questionné : cette pratique aiderait-elle l'implantation de la culture même dans les modalités travaillées ? Est-ce un facteur supplémentaire à étudier ? Il a été fait le choix sur le dispositif de garder une approche systémique : cet apport en début de cycle est un apport nécessaire à la plantation dans les sols compacts non travaillés et est alors spécifique à ces derniers. Sur les prochains cycles, peut-être que la quantité d'eau apportée sera moins importante.

2. La comparaison de pratiques agricoles, une extrapolation limitée

La présente étude permet de comparer 4 systèmes de production maraîchère. En revanche, les résultats obtenus ne sont valables que pour des conditions pédoclimatiques similaires à celles de la station expérimentale. Ainsi, après un premier cycle de culture, il semble que les systèmes maraîchers peu et pas travaillés associés à des apports massifs de MO soient plus performants sur des sols limoneux en climat méditerranéen. Il n'est pas possible d'extrapoler ces résultats sur d'autres sols, dans d'autres climats. La réduction du travail du sol pourrait avoir d'autres impacts, potentiellement négatifs, sur des sols argileux ou sableux : un dispositif similaire sur textures de sol variées permettrait de

compléter cette étude. Peigné *et al.* en 2007 mentionnent l'émergence de plus de problèmes (manque de structure du sol) lors d'un arrêt du travail sur sols sableux, particulièrement dans un climat humide.

Aussi, les résultats doivent-être nuancés : il ne s'agit que du premier cycle cultural du dispositif SMART-Sol. Même si l'arrêt du travail du sol date de 2019, l'effet de l'historique des parcelles sur les résultats est encore important. A ce jour, les modalités travaillées **T-ref** et **T-NA** n'ont pas reçu les mêmes apports de compost. Cela est prévu pour 2024. Les effets des pratiques de travail du sol et d'apport de MO sur les sols, les performances agronomiques et hydriques doivent être étudiés à plus long terme. En plus, pour s'affranchir de l'effet culture, il est important de réaliser des mesures sur plusieurs cycles de cultures. Le maraîchage agroécologique correspond aujourd'hui à des systèmes diversifiés. Les pratiques culturales de fond que sont le travail du sol et les apports de MO doivent alors être validés sur des espèces de familles différentes (culture d'été ou d'hiver ; légume-fruits, -feuilles ou -racines...).

3. Un regard critique sur la méthode statistique utilisée

Les tests statistiques univariés utilisés peuvent être questionnés. Des ANOVAs paramétriques ou non paramétriques sont réalisées en fonction de la distribution des données. Lorsque les variances ne sont pas homogènes et que les résidus ne sont ni indépendants ni normaux, des ANOVAs non paramétriques sont nécessaires. Les tests de Kruskal-Wallis ont alors été choisis. Ils sont préconisés par certains auteurs sur des ANOVAs à un facteur pour travailler sur les données brutes et éviter de transformer les données (Della Vedova, 2018). Par exemple, la transformation des données par un logarithme fait un focus sur les faibles valeurs : cela estompe alors l'influence des valeurs hautes.

Le test de Kruskal-Wallis est un test basé sur les rangs des individus (DATAtab Team, 2023), soit sur le positionnement de la valeur obtenue par rapport aux valeurs des autres individus. De ce fait, l'écart à la moyenne n'est pas considéré, il y a une perte d'information. De plus, lorsqu'il y a des valeurs *ex-aequo*, le test ne parvient pas à traiter la donnée et fait des approximations.

Une autre limite des tests non paramétriques est le test *post-hoc* de Wilcoxon associé. Ce dernier permet une comparaison deux à deux des résultats pour comparer les systèmes étudiés. La méthode de test « Bonferroni » est utilisée, méthode principalement recommandée. Elle est toutefois sévère : elle conserve souvent l'hypothèse nulle H_0 (Hochberg, 1988). Le test peut donc ne pas considérer comme significatives certaines différences.

Une piste d'amélioration des analyses statistiques serait d'utiliser des modèles linéaires mixtes généralisés (GLMM). Ces modèles s'utilisent pour les indicateurs dont les résultats sont bornés – proportions (dégradation de substrats carbonés par les organismes du sol, fréquence et taux de mycorhization, taux de non-commercialisation), notes (évaluation visuelle de la structure du sol,

stabilité des agrégats, SHI) ou résultats d'absorbance compris entre 0 et 1 (respiration basale du sol). Ces modèles n'ont pas été approfondis par manque de temps et de connaissances sur le sujet.

Synthétiquement, les GLMM permettent de considérer une non-indépendance des données : cela signifie qu'ils intègrent un ou plusieurs facteurs dits aléatoires. Le facteur aléatoire a un effet sur les résultats, on le sait, mais ce n'est pas cet effet que l'on souhaite évaluer. On souhaite s'intéresser à l'effet du facteur dit fixe, ici la modalité (Della Vedova, 2019). Par exemple, la dégradation de substrats carbonés par les organismes sol est liée à l'humidité et la température de celui-ci (Bouthier *et al.*, 2014). La dégradation plus importante en modalité faiblement travaillée **T-NAsup** peut alors être liée à une humidité pondérale du sol supérieure au moment des mesures. Inclure le facteur fixe *Humidité pondérale* dans l'analyse permet d'être plus précis et de faire un focus sur le facteur étudié, ici sur le travail du sol associé à un apport important de MO. L'humidité pondérale du sol est certes impactée par les modalités mais cette analyse est réalisée séparément. Dans cet exemple, le GLMM permet de connaître le réel impact des systèmes sur les activités de dégradation des organismes.

4. Biofunctool® : quels retours d'expériences sur cette méthode ?

Cette campagne de mesure d'évaluation de la santé des sols était la première mise en place sur l'UE d'Alénya avec la méthode Biofunctool®. Cette méthode a été choisie pour plusieurs avantages :

- Elle intègre 3 fonctions du sol et permet une approche intégrative de la santé des sols.
- Elle se déploie relativement rapidement. Il y a 3 mesures *in situ*, à savoir : la mesure de dégradation de substrats carbonés par les organismes du sol *Bait lamina*, l'évaluation visuelle de la structure *VESS* et les tests d'infiltration *Beerkan*. Des échantillonnages sont réalisés pour les autres indicateurs. Les parcelles sont mobilisées pendant environ une semaine avant la perturbation du sol. L'impact sur la succession culturale du déploiement de la méthode est plutôt limité.
- Certains indicateurs sont très visuels et peuvent alors être parlants pour différents publics : *Bait lamina*, décoloration des cuves *Situresp* par la respiration des microorganismes.
- La méthode permet d'aller jusqu'à la construction d'un indice intégrateur SHI : celui-ci est très intéressant pour avoir une vision globale de la santé des sols en fonction des systèmes. Il constitue un bon support d'échange et de communication. Il peut servir par exemple à discuter avec les agriculteurs.

Cette méthode présente aussi des limites. Rappelons-le, l'objectif est d'avoir un outil accessible à des personnes non spécialisées. Les indicateurs relatifs au maintien de la structure du sol et *Bait lamina* y répondent bien. Toutefois, pour les autres, il faut être équipé de matériels de laboratoire : membrane échangeuse d'ions, spectrophotomètre et produits chimiques spécifiques nécessitant des mesures de

sécurité (permanganate de potassium). Dans cette étude, la dynamique des nitrates dans le sol n'a pas pu être mesurée (pas de membrane échangeuse d'ions). Cela questionne l'accessibilité de l'outil.

Une autre limite mise en avant par l'application de la méthode sur l'unité est le manque de fiabilité de certains tests. Le test d'évaluation visuelle de la structure VESS a été développé en régions humides, non représentatives du contexte de l'étude : les sols d'Alénya étant secs au moment de l'évaluation, la détermination des agrégats était difficile. Le test Bêche pourrait être choisi ici. Ce test ne se base pas sur les agrégats mais sur les blocs se détachant sur la bêche. Il distingue 3 catégories de mottes : celles tassées, celles tassées avec une recolonisation des organismes du sol et celles grumeleuses et visiblement poreuses (Peigné, 2016). De plus, les indicateurs VESS et *Beerkan* semblent présenter des biais observateurs importants. Un bon calage entre les opérateurs est primordial.

A ce jour, la méthode Biofunctool® manque de références. L'objectif de l'outil est de comparer les modalités d'un même site entre elles mais des références sur de nombreux systèmes et types de sols permettraient de valider les résultats obtenus et d'avoir un outil plus robuste. Par exemple, dans la construction du SHI le résultat de VESS est considéré comme meilleur pour une note optimale. Toutefois, il y a encore peu de recul sur la valeur que doit prendre cet optimum. Il se base sur le postulat qu'un sol en bonne santé n'est ni trop compact ni trop friable. L'optimum est alors fixé, plutôt arbitrairement, à 2,5/5. Plus de recul et de références sont nécessaires. Le dépôt d'une base de données ouverte par l'UE d'Alénya permet d'en créer sur des sols limono-sableux.

Enfin, l'étude des horizons superficiels du sol (0-15 cm) réalisée avec la méthode Biofunctool® – seul le test VESS descend jusqu'à 25 cm – est questionnable. Sur cette profondeur, les organismes du sol se développent le plus. Toutefois, en étudiant les premiers cm, on néglige la répartition des nutriments du sol (C, N notamment) le long du profil et les impacts en profondeur du travail sur la structure du sol. Il serait intéressant de mesurer le carbone labile, la disponibilité en nitrates, la respiration basale et la stabilité des agrégats du sol à deux profondeurs : 0-10 cm et 10-30 cm.

5. Quelques pistes d'améliorations après une première campagne de mesures

Les mesures relatives à l'eau pourront être ajustées pour la prochaine campagne : ajout d'un compteur pour mesurer l'apport d'eau manuel réalisé à la plantation, calibration des TDR (possible *a posteriori* sur les données déjà acquises), intervalle de mesure des Watermark de 5 minutes sur toute la durée du cycle cultural. De plus, après un premier traitement des données, il semblerait qu'apporter les irrigations en même temps sur les 4 modalités permettrait une meilleure comparaison de la dynamique de l'eau dans le sol. Pour ce faire, l'automate gérant l'irrigation doit être davantage étudié. Mais, s'il faut réaliser de grosses modifications sur le réseau pour rendre les tunnels indépendants au regard de l'irrigation, il est vrai que les coûts engendrés ne pourraient pas être supportés par le projet.

Le pilotage de l'irrigation par des outils informatiques a parfois créé quelques imprévus. Les choix réalisés sur les seuils d'ETP ont par exemple été mis en application tardivement sur la modalité **T-NAsup** (mauvais enregistrement informatique) entraînant un fractionnement de l'irrigation tardif non désiré. Les bugs ponctuels de l'automate sont problématiques et il a fallu s'adapter : irrigation manuelle de rattrapage, changement des K_c ... Une meilleure compréhension de cet outil serait nécessaire. A noter, une vanne d'irrigation semble dysfonctionner dans le tunnel **NT**. Elle serait peut-être à changer.

Certains indicateurs s'intéressant à la plante (partie agronomique) peuvent être questionnés. La mesure de reprise des plantes est pertinent mais difficile à objectiver : à quel moment est-il considéré une bonne implantation dans le sol des jeunes plants ? Peu de références sont disponibles.

De plus, pendant ce premier cycle cultural, des mesures de la concentration d'azote dans les pétioles des feuilles ont été réalisées (non présentées). Toutefois, s'il semble être un bon outil de pilotage, cet indicateur n'est peut-être pas pertinent dans le cadre de l'évaluation multicritère : le manque de référentiels limite l'interprétation des résultats. Pour approfondir l'évaluation de la performance agronomique des systèmes, des mesures de qualité nutritionnelle pourraient être réalisées : analyse sensorielle, taux de sucre dans le fruit, fermeté. Ces indicateurs ont en revanche aussi leurs limites. En effet, l'analyse sensorielle est lourde et chronophage à mettre en place : elle peut nécessiter la formation d'un jury expert, notamment pour des produits ne présentant pas de différences évidentes. Le taux de sucre et la fermeté ne sont pas pertinents pour toutes les cultures (tomate versus blette).

Ce premier cycle cultural a été particulièrement touché par les ravageurs. Sur les prochains cycles, il pourrait être envisagé de respecter un ordre de passage du tunnel le moins infesté au plus infesté pour limiter les risques de contaminations intermodalités liées aux opérateurs. Cela nécessite une très bonne coordination entre les équipes. En revanche, cette année, la culture a été contaminée par les acariens dès la pépinière, toutes les modalités étaient donc concernées. Les comptages et observations visuelles, réalisés de façon hebdomadaire pour optimiser le pilotage de la protection des cultures, seraient intéressants à poursuivre sur les prochains cycles : si l'objectif de l'étude n'est pas de connaître l'impact des modalités sur la présence de ravageurs, une compréhension des communautés présentes permettrait de valider la représentativité des ZAD. En effet, les foyers de ravageurs affaiblissent les plantes et impactent leur développement et leur prélèvement d'eau et de nutriments dans le sol. Des ZAD anormalement touchées par les ravageurs questionnent les résultats (agronomiques et hydriques).

Aussi, dans l'optique de valider la représentativité des ZAD, il serait intéressant d'avoir une idée du rendement par modalité. Les caisses de récoltes classées par tunnel maraîcher pourraient être comptées à leur arrivée dans le hangar. Les écarts entre modalités seraient alors évalués et comparés avec les mesures des ZAD. Là encore, une bonne coordination d'équipe est nécessaire.

Enfin, les passages de roues des engins de travail du sol seront considérés pour les prochaines campagnes de mesures Biofunctool®. Les indicateurs relatifs au maintien de la structure du sol peuvent en être particulièrement impactés.

6. Quelques perspectives pour rendre ces données utilisables sur le terrain

Les données de cette étude pourraient être confrontées à la réalité du terrain par une présentation et discussion avec des maraîchers des Pyrénées Orientales. Cela permettrait de connaître leurs perceptions et appréhensions sur des pratiques agroécologiques comme la réduction du travail du sol et l'apport de MO. Des retours d'expériences pourraient amender la discussion des résultats.

Dans une approche plus large, à l'échelle du projet TAI-Oc, une application chez les agriculteurs est prévue avec l'implantation de sondes hydriques à bas coûts. Cela permettra d'élargir à plusieurs types de sols et pratiques agroécologiques les mesures hydriques. Il serait intéressant de pouvoir inclure l'outil Biofunctool® afin de générer plus de références et une compréhension globale de l'impact de pratiques agroécologiques sur le sol, l'eau et la production agricole.

VIII. Réflexion Qualité de vie au travail

Le contexte de l'unité est particulier : cette antenne INRAE rattachée administrativement au centre Occitanie-Montpellier est relativement isolée. Ce sentiment d'isolement est en partie dû au type de structure. A l'inverse d'une unité mixte, une Unité Expérimentale n'est pas associée à d'autres instituts techniques, de recherche ou de l'enseignement supérieur. L'UE d'Alénya est aussi la seule entité INRAE à mettre en œuvre des expérimentations sur les systèmes maraîchers sous abris. De ce fait, les échanges entre chercheurs et entre techniciens d'unités différentes sont limités. Des salariés témoignent pourtant de l'importance de ces échanges pour donner plus de sens à leurs missions.

L'immersion de 6 mois dans l'UE Maraîchage d'Alénya a permis de noter que l'organisation des équipes au quotidien est perfectible. « Favoriser un dialogue social de qualité » et « Impliquer les salariés concernés dans l'organisation future du travail » sont les 2 points relatifs à la qualité de vie au travail (QVT) développés dans cette partie. Ils sont extraits du référentiel ISARA.

L'équipe de l'unité est scindée en deux : d'un côté le pôle « Recherche et Expérimentation » dite équipe de *Recherche*, de l'autre le pôle « Expérimentation et Gestion des cultures » dite de *Terrain*. L'équipe de *Terrain* gère l'exploitation maraîchère au niveau fonctionnel depuis la croissance des plants en pépinière jusqu'à la commercialisation des légumes en passant par l'implantation de jachères fleuries et l'entretien du site. Elle contribue aux mesures expérimentales. L'équipe de *Recherche* conceptualise et monte des projets, rédige les protocoles, prend les décisions de pilotage (irrigation,

fertilisation, travail du sol). Les consignes sont transmises en réunion hebdomadaire. Elle aide aux opérations-clés sur le terrain et s'occupe du traitement et de la valorisation des données.

Cette séparation est matérielle, les bureaux et lieux de pause sont différents. Elle est aussi immatérielle, les relations entre ces deux équipes sont plutôt délicates. En effet, un questionnaire en ligne soumis à l'équipe en 2017 a fait ressortir l'existence de tensions. Pour plus de 90% des sondés, la communication entre les deux équipes est mauvaise et un manque d'esprit d'équipe et de collaboration est souligné. Ce questionnaire met en avant l'existence d'attitudes blessantes et de tensions/conflits. Pendant ce stage, il a pu être constaté que l'équipe de *Terrain* reproche parfois à l'équipe de *Recherche* certaines décisions prises sur le pilotage et leur investissement sur le terrain (trop présente, pas assez présente). L'équipe de *Terrain* se sent parfois dévalorisée (plus de 50% des répondants le mentionnent en 2017).

Ces tensions, toujours présentes en 2022, peuvent paraître inévitables : lorsqu'une équipe donne des directives impactant le travail d'une autre équipe au quotidien, des tensions apparaissent. Qui plus est, sur des dispositifs expérimentaux, il s'agit souvent de contraintes pour les techniciens agricoles.

Dans ce contexte, le management des équipes n'est pas simple. Cette année, la direction a initié plusieurs changements pour la rentrée de septembre. L'objectif est de favoriser un dialogue entre les équipes. Tout d'abord, le format de la réunion hebdomadaire est repensé. Une assemblée générale regroupant l'équipe a permis d'impliquer les salariés dans cette démarche. Jusqu'alors, cette réunion regroupait en salle tous les membres de l'UE dans un format plutôt protocolaire avec des échanges peu fluides. Ici aussi, la séparation entre les deux équipes était marquée par le positionnement des salariés dans la salle. Le nouveau format prévoit une réunion hebdomadaire plus informelle dans le hangar de l'exploitation regroupant uniquement les personnes concernées par les projets en cours. Le but sera d'échanger sur les tâches opérationnelles à venir. En complément, pour les informations diverses et générales, une réunion mensuelle se tiendra en salle avec la possibilité de présenter certains résultats ou projet. Ensuite, un nouveau chef d'exploitation rejoindra l'équipe en septembre. Il coordonnera l'équipe de *Terrain* et fera le lien avec l'équipe de *Recherche* et la direction. L'arrivée d'un manager pour l'équipe de *Terrain*, ayant un regard extérieur à l'UE, pourrait permettre d'apaiser les tensions.

Ainsi, l'enjeu QVT de l'UE est de réussir à établir un dialogue de qualité entre les salariés pour mener à bien les projets. La mise en place de nouvelles solutions vise à créer plus de cohésion et d'esprit d'équipe pour un cadre de travail agréable à tous.

Conclusion

La transition agroécologique est nécessaire pour construire les systèmes viables et durables de demain. Ces systèmes doivent permettre une production agricole de qualité et en quantité suffisante

tout en prenant soin des sols et de leurs fonctions et en économisant la ressource en eau. Les pratiques de réduction du travail du sol et d'apport de MO sont une première piste pour améliorer les systèmes maraîchers en sols limoneux. Quatre ans après l'arrêt du travail du sol, on note déjà des impacts sur la santé des sols, la performance agronomique et l'efficacité de l'irrigation.

Les systèmes en sols limoneux pas ou peu travaillés associés à des apports plutôt massifs de MO **T-NA^{sup}** et **NT** ont une santé des sols améliorée. Cela s'explique par une plus forte humidité pondérale, une concentration supérieure en nutriments (carbone labile et nitrates), une activité importante des organismes du sol en surface et par la création de microporosité stabilisant les particules de sols. Ces systèmes voient dans un premier temps leur densité apparente augmenter. Le suivi à long terme dans le dispositif SMART-Sol permettra de savoir si les activités de bioturbations pourront compenser cette prise en masse du sol limoneux. L'installation de communautés biologiques observée semble être un bon début. Les AMF semblent être, elles, plus présentes dans les systèmes aux faibles apports de MO **T-ref** et **T-NA** d'après les résultats de la première campagne de mesure.

Dans le même temps, les résultats sur les indicateurs agronomiques étudiés ne sont pas impactés négativement par la réduction du travail du sol associée à d'importants apports de MO. Une précocité de production de concombres est notée pour **NT**, cela sera à confirmer sur d'autres cycles de culture. Les rendements des modalités peu et pas travaillées semblent meilleurs que les modalités travaillées associées à de faibles apports de MO. S'il faudra confirmer ce résultat sur plusieurs cycles culturaux et plusieurs espèces légumières, il peut être avancé ce qui suit : les rendements de concombres, cultivés sur des sols limoneux et dans des conditions de restriction de l'usage de l'eau, ont été au moins aussi bons voire meilleurs en systèmes **T-NA^{sup}** et **NT** qu'en systèmes **T-ref** et **T-NA**.

Ce mémoire n'a finalement pas approfondi l'impact de ces pratiques sur la dynamique de l'eau dans le sol autant que prévu. Il semble que les sols faiblement travaillés associés à des apports massifs de MO tamponnent davantage les apports d'eau. Ces sols s'humidifient et s'assèchent moins vite. La circulation de l'eau dans les microporosités du sol semble permettre une meilleure rétention. Cela est à confirmer à partir des données récoltées sur plus de répétitions. Les différences d'humidité mesurées par les sondes TDR pourront être comparées *a posteriori* après calibration des sondes. Le lien avec le potentiel hydrique sera approfondi à l'avenir.

La suite du dispositif SMART-Sol permettra de valider ou d'infirmer ces premiers résultats sur plusieurs cycles de cultures et sur plusieurs espèces cultivées. Cela permettra aussi de prendre en compte les effets à plus long terme de ces pratiques en mettant en avant les contraintes et les avantages de la réduction du travail du sol associée à des apports massifs de MO aux niveaux agronomique, environnemental et technique.

Bilan personnel

Ce stage m'a permis de me mettre dans une posture d'ingénieur en devenir. Cette partie illustre quelques valeurs de la charte éthique de l'ingénieur qui m'ont guidée pendant ce stage (IESF, 2001).

Ce mémoire m'a poussée à être concise, précise et rigoureuse pour transmettre les résultats obtenus cette année et rendre accessibles ces données. J'ai travaillé sur la méthode employée et ai proposé un regard critique sur celle-ci : un ingénieur doit être capable de reconnaître les limites de ses travaux et de proposer des pistes d'amélioration. Ce stage m'a fait découvrir la recherche expérimentale et m'a fait comprendre l'importance d'être objective. La recherche fonctionnant par financement, nous devons faire le mieux possible avec les moyens disponibles (financiers mais aussi humains et matériels).

J'ai à cœur de travailler en lien avec l'agriculture, la gestion durable des sols et des ressources naturelles. Ce projet m'a beaucoup plus, il s'inscrit dans une démarche de développement durable. En effet, il s'intéresse à comment protéger les sols et la ressource en eau (environnement) tout en maintenant une production agricole (économique) dont les contraintes de production restent supportables pour les maraîchers (social). Cela résonne avec les besoins sociétaux : une production alimentaire durable pour demain.

Références Bibliographiques

- ABDOLLAHI, L., HANSEN, E.M., RICKSON, R.J. et MUNKHOLM, L.J., 2015. Overall assessment of soil quality on humid sandy loams: Effects of location, rotation and tillage. *Soil and Tillage Research*. janvier 2015. Vol. 145, pp. 29-36. DOI 10.1016/j.still.2014.08.009.
- AGUILERA, E., DÍAZ-GAONA, C., GARCÍA-LAUREANO, R., REYES-PALOMO, C., GUZMÁN, G. I., ORTOLANI, L., SÁNCHEZ-RODRÍGUEZ, M. et RODRÍGUEZ-ESTÉVEZ, V., 2020. Agroecology for adaptation to climate change and resource depletion in the Mediterranean region. A review. *Agricultural Systems*. mai 2020. Vol. 181, pp. 102809. DOI 10.1016/j.agsy.2020.102809.
- ALLETTO, L., CONSTANTIN, J. et DUSTILLO, V., 2021. *Pratiques agroécologiques et impacts sur la gestion quantitative et qualitative de l'eau à l'échelle de la parcelle agricole : Caractérisation des processus par expérimentations au champ et modélisation*. Synthèse finale des travaux du Groupe de Tâches 1.
- ÁLVARO-FUENTES, J., LÓPEZ, M. V., CANTERO-MARTINEZ, C. et ARRÚE, J. L., 2008. Tillage Effects on Soil Organic Carbon Fractions in Mediterranean Dryland Agroecosystems. *Soil Science Society of America Journal*. mars 2008. Vol. 72, n° 2, pp. 541-547. DOI 10.2136/sssaj2007.0164.
- ANDREWS, S.S., KARLEN, D.L. et MITCHELL, J.P., 2002. A comparison of soil quality indexing methods for vegetable production systems in Northern California. *Agriculture, Ecosystems & Environment*. juin 2002. Vol. 90, n° 1, pp. 25-45. DOI 10.1016/S0167-8809(01)00174-8.
- ANDREWS, Susan S., KARLEN, Douglas L. et CAMBARDELLA, Cynthia A., 2004. The Soil Management Assessment Framework: A Quantitative Soil Quality Evaluation Method. *Soil Science Society of America Journal*. novembre 2004. Vol. 68, n° 6, pp. 1945-1962. DOI 10.2136/sssaj2004.1945.
- AZOOZ, R. H. et ARSHAD, M. A., 1996. Soil infiltration and hydraulic conductivity under long-term no-tillage and conventional tillage systems. *Canadian journal of soil science*. 1996. Vol. 76, n° 2, pp. 143-152.
- BAGNOULS, F. et GAUSSEN, Henri, 1957. Les climats biologiques et leur classification. *Annales de géographie*. 1957. Vol. 66, n° 355, pp. 193-220. DOI 10.3406/geo.1957.18273.
- BAGYARAJ, D. J., 2014. Ecology of Arbuscular Mycorrhizal Fungi. In : KHARWAR, R.N., UPADHYAY, R.S., DUBEY, N.K. et RAGHUWANSHI, Richa (éd.), *Microbial Diversity and Biotechnology in Food Security* [en ligne]. New Delhi : Springer India. pp. 133-146. [Consulté le 20 juillet 2023]. ISBN 978-81-322-1800-5. Disponible à l'adresse : https://link.springer.com/10.1007/978-81-322-1801-2_10
- BARRIOS, Edmundo, GEMMILL-HERREN, Barbara, BICKSLER, Abram, SILIPRANDI, Emma, BRATHWAITE, Ronnie, MOLLER, Soren, BATELLO, Caterina et TITTONELL, Pablo, 2020. The 10 Elements of Agroecology: enabling transitions towards sustainable agriculture and food systems through visual narratives. *Ecosystems and People*. 1 janvier 2020. Vol. 16, n° 1, pp. 230-247. DOI 10.1080/26395916.2020.1808705.
- BEILLOUIN, Damien, BEN-ARI, Tamara, MALÉZIEUX, Eric, SEUFERT, Verena et MAKOWSKI, David, 2021. Positive but variable effects of crop diversification on biodiversity and ecosystem services. *Global Change Biology*. octobre 2021. Vol. 27, n° 19, pp. 4697-4710. DOI 10.1111/gcb.15747.
- BLANCO-CANQUI, Humberto et RUIS, Sabrina J., 2018. No-tillage and soil physical environment. *Geoderma*. septembre 2018. Vol. 326, pp. 164-200. DOI 10.1016/j.geoderma.2018.03.011.

BOIZARD, H, CHENU, C, LABREUCHE, J et ROGER-ESTRADE, J, 2014. Dynamique de la structure du sol en travail et non travail du sol. In : *Faut-il travailler le sol ? Acquis et innovations pour une agriculture durable*. Quae, Arvalis-Institut du végétal. Versailles. pp. 13. Savoir-faire.

BONGIORNO, Giulia, BÜNEMANN, Else K., OGUEJIOFOR, Chidinma U., MEIER, Jennifer, GORT, Gerrit, COMANS, Rob, MÄDER, Paul, BRUSSAARD, Lijbert et DE GOEDE, Ron, 2019. Sensitivity of labile carbon fractions to tillage and organic matter management and their potential as comprehensive soil quality indicators across pedoclimatic conditions in Europe. *Ecological Indicators*. avril 2019. Vol. 99, pp. 38-50. DOI 10.1016/j.ecolind.2018.12.008.

BOUTHIER, A., DEJEAN, C., DUBOCS, F., HECKENROTH, J-V., RACT MADOUX, A., RUELLE, P. et URRUTY, N., 2022. Gestion tactique de l'irrigation à l'échelle de la parcelle. In : *Guide pratique de l'irrigation (4e édition)*. Quae. Versailles. pp. 49. Matière à débattre et décider.

BOUTHIER, A., PELOSI, C., VILLENAVE, C., PERES, G., HEDDE, M., RANJARD, L., VIAN, J-F., PEIGNE, J., CORTET, J., BISPO, A. et PIRON, D., 2014. Impact du travail du sol sur son fonctionnement biologique. In : *Faut-il travailler le sol ? Acquis et innovations pour une agriculture durable*. Quae, Arvalis-Institut du végétal. Versailles. pp. 20. Savoir-faire.

BOUVIER, Caroline, 2019. *Des légumes sur sol vivant : des clefs pour ne pas se tromper*. Hiver -2020 2019. Actu Bio.

BRAUMAN, A. et THOUMAZEAU, A., 2020. Biofunctool® : un outil de terrain pour évaluer la santé des sols, basé sur la mesure de fonctions issues de l'activité des organismes du sol. *Etude et Gestion des Sols*. 2020. Vol. 27, n° 289-303.

BRUAND, Ary et COQUET, Yves, 2005. *Les sols et le cycle de l'eau*. Dunod.

BÜNEMANN, Else K., BONGIORNO, Giulia, BAI, Zhanguo, CREAMER, Rachel E., DE DEYN, Gerlinde, DE GOEDE, Ron, FLESKENS, Luuk, GEISSEN, Violette, KUYPER, Thom W., MÄDER, Paul, PULLEMAN, Mirjam, SUKKELE, Wijnand, VAN GROENIGEN, Jan Willem et BRUSSAARD, Lijbert, 2018. Soil quality – A critical review. *Soil Biology and Biochemistry*. Mai 2018. Vol. 120, pp. 105-125. DOI 10.1016/j.soilbio.2018.01.030.

CARAES, D et VAUTHIER, M, 2022. *Analyses et perspectives - Economie Agricole* [en ligne]. Juillet 2022. Chambre d'Agriculture France. [Consulté le 26 juillet 2023]. Disponible à l'adresse : https://chambres-agriculture.fr/fileadmin/user_upload/National/002_inst-site-chambres/actu/2022/Analyses-Perspectives_recensement-agricole_01072022.pdf

CATALOGNA, Maxime, DUBOIS, Muriel et NAVARRETE, Mireille, 2018. Diversity of experimentation by farmers engaged in agroecology. *Agronomy for Sustainable Development* [en ligne]. octobre 2018. Vol. 38, n° 5. [Consulté le 26 juillet 2023]. DOI 10.1007/s13593-018-0526-2. Disponible à l'adresse : <http://link.springer.com/10.1007/s13593-018-0526-2>

CHAMBRE D'AGRICULTURE DU GERS, 2017. *Bilan hydrique*. 2017.

CHEVALLIER, T, BLANCHART, E, GIRARDIN, C, MARIOTTI, A, ALBRECHT, A et FELLER, C, 2001. The role of biological activity (roots, earthworms) in medium-term C dynamics in vertisol under a *Digitaria decumbens* (Gramineae) pasture. *Applied Soil Ecology*. 1 janvier 2001. Vol. 16, n° 1, pp. 11-21. DOI 10.1016/S0929-1393(00)00102-5.

CRESTIN, J-M. et BOYER, I., 2009. *L'irrigation du melon en Provence, sous abris et plein champ*. 2009. Ardepi.

DATATAB TEAM, 2023. t-Test, khi-deux, ANOVA, Régression, Corrélation... *Datatab* [en ligne]. 2023. [Consulté le 13 août 2023]. Disponible à l'adresse : <https://datatab.fr/tutorial/kruskal-wallis-test>

DAVID, Christophe, WEZEL, Alexander, BELLON, Stéphane, DORÉ, Thierry et MALÉZIEUX, Eric, 2011. *Agroécologie*. 2011.

DELALANDE, Magalie, GAVALAND, André, MISTOU, Marie Noelle, BURGER, Philippe, MEUNIER, Florence, MARANDEL, Rémy, MIGLIONICO, Guillaume, FARGIER, Sébastien et DOUSSAN, Claude, 2017. Mesure de l'eau du sol: questions, méthodes et outils Exemples d'application sur deux plateformes champs du réseau «PHENOME». *Cahier des Techniques de l'INRA*. 2017. Vol. 90, pp. 1-32.

DELAUNOIS, A., 2014. *Caractérisation de la réserve en eau des sols à partir des sondages pédologiques à la tarière*. 2014. Chambre d'agriculture du Tarn.

DELLA VEDOVA, C, 2018. ANOVA non paramétrique à un facteur. *Della Data* [en ligne]. 10 juillet 2018. [Consulté le 13 août 2023]. Disponible à l'adresse : <https://delladata.fr/anova-non-parametrique-kruskal-wallis/>

DELLA VEDOVA, C, 2019. Introduction aux GLMM avec données de proportion. *Della Data* [en ligne]. 12 avril 2019. [Consulté le 14 août 2023]. Disponible à l'adresse : <https://delladata.fr/introduction-aux-glm-avec-donnees-de-proportion/>

D'HOSE, Tommy, COUGNON, Mathias, DE VliegHER, Alex, VANDECASTEELE, Bart, VIAENE, Nicole, CORNELIS, Wim, VAN BOCKSTAELE, Erik et REHEUL, Dirk, 2014. The positive relationship between soil quality and crop production: A case study on the effect of farm compost application. *Applied Soil Ecology*. Mars 2014. Vol. 75, pp. 189-198. DOI 10.1016/j.apsoil.2013.11.013.

DIMASSI, Bassem, MARY, Bruno, FONTAINE, Sébastien, PERVEEN, Nazia, REVAILLOT, Sandrine et COHAN, Jean-Pierre, 2014. Effect of nutrients availability and long-term tillage on priming effect and soil C mineralization. *Soil Biology and Biochemistry*. novembre 2014. Vol. 78, pp. 332-339. DOI 10.1016/j.soilbio.2014.07.016.

DÖRFLIGER, N. et GASCUEL, C., 2018. *Le sol et l'eau, un couple : Connaître et gérer les sols pour préserver l'eau*. 2018. Geosciences. hal-01075155

FAHMY, S, LALANDE, R, GAGNON, B et GILLAM, K, 2000. Effect of composted and non-composted pulp fibre residue waste as soil amendment on soil moisture, potato yield, and soil nitrogen. 2000. pp. 737-758.

FERNANDEZ, Margarita, GOODALL, Katherine, OLSON, Meryl et MENDEZ, Ernesto, 2012. Agroecology and Alternative Agrifood Movements in the United States: Towards a Sustainable Agrifood System. *Journal of Sustainable Agriculture*. 5 octobre 2012. pp. 121005074109009. DOI 10.1080/10440046.2012.735633.

FRANZLUEBBERS, A.J, 2002. Water infiltration and soil structure related to organic matter and its stratification with depth. *Soil and Tillage Research*. juillet 2002. Vol. 66, n° 2, pp. 197-205. DOI 10.1016/S0167-1987(02)00027-2.

GARBAYE, Jean, 2013. *La symbiose mycorhizienne, une association entre les plantes et les champignons*. Quae. Versailles. SYNthèses. ISBN 978-2-7592-1963-6.

GRAB, Agence, 2010. Entretien du sol en maraîchage biologique. *Grab* [en ligne]. 2 août 2010. [Consulté le 27 juillet 2023]. Disponible à l'adresse : <https://www.grab.fr/entretenir-ses-sols-en-maraichage-bio/>

GRADWELL, M. W. et ARLIDGE, E. Z., 1971. Deterioration of soil structure in the market gardens of the Pukekohe District, New Zealand. *New Zealand Journal of Agricultural Research*. mai 1971. Vol. 14, n° 2, pp. 288-306. DOI 10.1080/00288233.1971.10427096.

GRANIER, A, 2019. Le continuum sol-plante-atmosphère. [en ligne]. 2019. [Consulté le 26 juillet 2023]. Disponible à l'adresse : <https://plantes-et-eau.fr/documentation/etats-et-transferts-hydriques-dans-et-a-travers-la-plante/23-transferts-et-etats-hydriques-dans-le-continuum-sol-plante-atmosphere/41-le-continuum-sol-plante-atmosphere>

GUIMARÃES, R. M. L., BALL, B. C. et TORMENA, C. A., 2011. Improvements in the visual evaluation of soil structure: Visual evaluation of soil structure. *Soil Use and Management*. juin 2011. pp. no-no. DOI 10.1111/j.1475-2743.2011.00354.x.

HAMEL, Chantal, SCHELLENBERG, Michael P., HANSON, Keith et WANG, Hong, 2007. Evaluation of the "bait-lamina test" to assess soil microfauna feeding activity in mixed grassland. *Applied Soil Ecology*. juin 2007. Vol. 36, n° 2-3, pp. 199-204. DOI 10.1016/j.apsoil.2007.02.004.

HARAMOTO, Erin R. et GALLANDT, Eric R., 2004. Brassica cover cropping for weed management: A review. *Renewable Agriculture and Food Systems*. Décembre 2004. Vol. 19, n° 04, pp. 187-198. DOI 10.1079/RAFS200490.

HAZARD, Laurent, MONTEIL, Claude, MICHEL, Duru, BEDOUSSAC, Laurent, JUSTES, Eric et THEAU, Jean-Pierre, 2016. Agroécologie. *Dicoagroecologie*.

HELGASON, B.L., WALLEY, F.L. et GERMIDA, J.J., 2010. No-till soil management increases microbial biomass and alters community profiles in soil aggregates. *Applied Soil Ecology*. novembre 2010. Vol. 46, n° 3, pp. 390-397. DOI 10.1016/j.apsoil.2010.10.002.

HIRSHY, Matthieu, SALAZAR, Paola, TERRENTROY, Anne, PICAULT, Sébastien et LEVEAU, Lola, 2021. Désinfection du sol par la solarisation en cultures légumières - GECO. *Geco Ecophytopic* [en ligne]. 2021. [Consulté le 5 avril 2023]. Disponible à l'adresse : https://geco.ecophytopic.fr/concept/-/concept/voir/http%253A%252F%252Fwww%252Egeco%252Eecophytopic%252Efr%252Fgeco%252FConcept%252FLa_Solarisation

HOLLAND, J-M., 2004. The environmental consequences of adopting conservation tillage in Europe: reviewing the evidence. *Agriculture, Ecosystems & Environment*. 1 juin 2004. Vol. 103, n° 1, pp. 1-25. DOI 10.1016/j.agee.2003.12.018.

IESF, 2001. 150731_Charte_ethique.pdf. [en ligne]. 2001. [Consulté le 17 août 2023]. Disponible à l'adresse : http://home.iesf.fr/offres/doc_inline_src/752/150731_Charte_ethique.pdf

IGLESIAS, A, QUIROGA, S et SCHLICKENRIEDER, J, 2010. Climate change and agricultural adaptation: assessing management uncertainty for four crop types in Spain. *Climate Research*. 28 octobre 2010. Vol. 44, n° 1, pp. 83-94. DOI 10.3354/cr00921.

IMAZ, M.J., VIRTO, I., BESCANSÀ, P., ENRIQUE, A., FERNANDEZ-UGALDE, O. et KARLEN, D.L., 2010. Soil quality indicator response to tillage and residue management on semi-arid Mediterranean cropland. *Soil and Tillage Research*. mars 2010. Vol. 107, n° 1, pp. 17-25. DOI 10.1016/j.still.2010.02.003.

INRAE, 2023. FAQ de la Presse - Gestion de la ressource en eau. *calameo.com* [en ligne]. Juin 2023. [Consulté le 26 juillet 2023]. Disponible à l'adresse : <https://www.calameo.com/inrae/read/0068008965759321c100d?authid=rMtoosmGoy2g>

JACKSON, L.E, RAMIREZ, I, YOKOTA, R, FENNIMORE, S.A, KOIKE, S.T, HENDERSON, D.M, CHANEY, W.E, CALDERÓN, F.J et KLONSKY, K, 2004. On-farm assessment of organic matter and tillage management on vegetable yield, soil, weeds, pests, and economics in California. *Agriculture, Ecosystems & Environment*. août 2004. Vol. 103, n° 3, pp. 443-463. DOI 10.1016/j.agee.2003.11.013.

JANSA, Jan, WIEMKEN, Andres et FROSSARD, Emmanuel, 2006. The effects of agricultural practices on arbuscular mycorrhizal fungi. *Geological Society, London, Special Publications*. janvier 2006. Vol. 266, n° 1, pp. 89-115. DOI 10.1144/GSL.SP.2006.266.01.08.

KIBBLEWHITE, M.G, RITZ, K et SWIFT, M.J, 2008. Soil health in agricultural systems. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*. 27 février 2008. Vol. 363, n° 1492, pp. 685-701. DOI 10.1098/rstb.2007.2178.

LAURENT, François, 2012. *Agriculture et pollution de l'eau: modélisation des processus et analyse des dynamiques territoriales*. Université du Maine.

LAVELLE, Patrick, SPAIN, Alister, FONTE, Steven, BEDANO, Jose Camilo, BLANCHART, Eric, GALINDO, Victor, GRIMALDI, Michel, JIMENEZ, Juan Jose, VELASQUEZ, Elena et ZANGERLÉ, Anne, 2020. Soil aggregation, ecosystem engineers and the C cycle. *Acta Oecologica*. mai 2020. Vol. 105, pp. 103561. DOI 10.1016/j.actao.2020.103561.

LECOMPTE, F et GOILLON, C, 2015. Fertilité des sols et fertilisation en cultures maraîchères : enjeux agroécologiques, pratiques et outils. *4e rencontres du RED PACA : « Réussir l'agroécologie en région méditerranéenne »* [en ligne]. Avignon. 12 novembre 2015. [Consulté le 27 juillet 2023]. Disponible à l'adresse : https://paca.chambres-agriculture.fr/fileadmin/user_upload/Provence-Alpes-Cote_d_Azur/020_Inst_Paca/pages_regionales/Documents/Innovation/reseaux/red_paca_2015/2015-1_Fertilit%C3%A9_des_sols_et_fertilisation.pdf

LEFÈVRE, Amélie, PERRIN, Benjamin, LESUR-DUMOULIN, Claire, SALEMBIER, Chloé et NAVARRETE, Mireille, 2020. Challenges of complying with both food value chain specifications and agroecology principles in vegetable crop protection. *Agricultural Systems*. novembre 2020. Vol. 185, pp. 102953. DOI 10.1016/j.agsy.2020.102953.

LEHMANN, Johannes, BOSSIO, Deborah A., KÖGEL-KNABNER, Ingrid et RILLIG, Matthias C., 2020. The concept and future prospects of soil health. *Nature Reviews Earth & Environment*. 2020. Vol. 1, n° 10, pp. 544-553.

LIBOHOVA, Z., SEYBOLD, C., WYSOCKI, D., WILLS, S., SCHOENEBERGER, P., WILLIAMS, C., LINDBO, D., STOTT, D. et OWENS, P.R., 2018. Reevaluating the effects of soil organic matter and other properties on available water-holding capacity using the National Cooperative Soil Survey Characterization Database. *Journal of Soil and Water Conservation*. 2018. Vol. 73, n° 4, pp. 411-421. DOI 10.2489/jswc.73.4.411.

MAGRINI, Marie Benoit, ALAPHILIPPE, Aude, BERTAGNOLI, Stéphane, CADORÉ, Jean-Luc, CAILLAT, Hugues, CARLIN, Frédéric, CRESSANT, Marion, DEBAEKE, Philippe, DELABY, Luc et DUCLOS, Martine, 2023. Synthèse du chantier Agroécologie (AE) & Marché. *Séminaire de restitution du chantier « Agroécologie et Marché » des Groupes Filières d'INRAE*. Paris, France. Avril 2023.

MAHBOUBI, A. A., LAL, R. et FAUSSEY, N. R., 1993. Twenty-Eight Years of Tillage Effects on Two Soils in Ohio. *Soil Science Society of America Journal*. 1 mars 1993. Vol. 57, n° 2, pp. 506-512. DOI 10.2136/sssaj1993.03615995005700020034x.

MARAÎCHAGE SOL VIVANT, 2017. *13 portraits de fermes. Technique, agronomique, économique ; le sol vivant au coeur des pratiques*. 2017.

MARAÎCHAGE SOL VIVANT, 2021. *Projet FertiBioSol, Essais Fertilisation Carbonée massive*. 2021.

MARTINEZ, A-M., BOYER, I., CHARTON, P., ISBERIE, C. et ODET, J., 2012. *Comment évaluer les besoins en irrigation d'une culture maraîchère ?* Février 2012. Ardepi.

MARY, B, COHAN, J-P, DIMASSI, B, RECOUS, S et LAURENT, F, 2014. Effets du travail du sol sur les cycles biogéochimiques de l'azote et du carbone. In : *Faut-il travailler le sol ? Acquis et innovations pour une agriculture durable*. Quae, Arvalis-Institut du végétal. Versailles. pp. 22. Savoir-faire.

MAZOLLIER, Par Catherine, 2001. *AGRICULTURE BIOLOGIQUE : QUELQUES PRINCIPES DE BASE*. . 2001.

MENDEZ, V. Ernesto, BACON, Christopher M., COHEN, Roseann et GLIESSMAN, Stephen R., 2015. *Agroecology: A Transdisciplinary, Participatory and Action-oriented Approach*. CRC Press. ISBN 978-1-4822-4177-8.

MINASNY, B. et MCBRATNEY, A. B., 2018. Limited effect of organic matter on soil available water capacity. *European Journal of Soil Science*. janvier 2018. Vol. 69, n° 1, pp. 39-47. DOI 10.1111/ejss.12475.

MIRÁS-AVALOS, José M., ANTUNES, Pedro M., KOCH, Alexander, KHOSLA, Kamini, KLIRONOMOS, John N. et DUNFIELD, Kari E., 2011. The influence of tillage on the structure of rhizosphere and root-associated arbuscular mycorrhizal fungal communities. *Pedobiologia*. juillet 2011. Vol. 54, n° 4, pp. 235-241. DOI 10.1016/j.pedobi.2011.03.005.

MITCHELL, Jeffrey P., SHRESTHA, Anil, MATHESIUS, Konrad, SCOW, Kate M., SOUTHARD, Randal J., HANEY, Richard L., SCHMIDT, Radomir, MUNK, Daniel S. et HORWATH, William R., 2017. Cover cropping and no-tillage improve soil health in an arid irrigated cropping system in California's San Joaquin Valley, USA. *Soil and Tillage Research*. janvier 2017. Vol. 165, pp. 325-335. DOI 10.1016/j.still.2016.09.001.

MONTOROI, Jean-Pierre, 2012. Rôle des sols sur la génèse des inondations. In : *Publications du symposium européen sur les problèmes actuels de la protection contre les inondations de mars 2012*. 2012.

MOREL, Kevin et LÉGER, François, 2016. A conceptual framework for alternative farmers' strategic choices: the case of French organic market gardening microfarms. *Agroecology and Sustainable Food Systems*. 27 mai 2016. Vol. 40, n° 5, pp. 466-492. DOI 10.1080/21683565.2016.1140695.

MUÑOZ, A., 2021. Qu'est-ce que le maraîchage bio-intensif avec la méthode «Jardinier-maraîcher». *Institut jardinier-maraîcher* [en ligne]. 7 septembre 2021. [Consulté le 31 juillet 2023]. Disponible à l'adresse : <https://lejardiniermaraicher.com/agriculture/quest-ce-que-le-maraichage-bio-intensif-avec-la-methode-jardinier-maraicher/>

NAVARRETE, Mireille, LEFEVRE, Amélie, DUFILS, Arnaud, PARES, Laure et PERRIN, Benjamin, 2017. Concevoir et évaluer avec les acteurs des systèmes de culture adaptés à leurs cadres de contraintes et d'objectifs en production maraîchère sous abri. Mise en pratique et enseignements dans les projets GeDuNem et 4SYSLEG. *Innovations Agronomiques*. 2017. Vol. 61, pp. 33-49.

NEYTON, Sophie, ABBADY, Dana et SARTHOU, Jean-Pierre, 2018. Agroécosystème : Définition. [en ligne]. 2018. [Consulté le 28 août 2023]. DOI 10.17180/YS6M-A511. Disponible à l'adresse : <https://dicoagroecologie.fr/dictionnaire/agroecosysteme/>

NORRIS, Charlotte E. et CONGREVES, Katelyn A., 2018. Alternative Management Practices Improve Soil Health Indices in Intensive Vegetable Cropping Systems: A Review. *Frontiers in Environmental Science* [en ligne]. 12 juin 2018. Vol. 6. [Consulté le 31 juillet 2023]. DOI 10.3389/fenvs.2018.00050. Disponible à l'adresse : <https://www.frontiersin.org/article/10.3389/fenvs.2018.00050/full>

NOUWAKPO, Sayjro K., SONG, Juanli et GONZALEZ, Javier M., 2018. Soil structural stability assessment with the fluidized bed, aggregate stability, and rainfall simulation on long-term tillage and crop rotation systems. *Soil and Tillage Research*. mai 2018. Vol. 178, pp. 65-71. DOI 10.1016/j.still.2017.12.009.

NUNES, Márcio R., KARLEN, Douglas L., VEUM, Kristen S., MOORMAN, Thomas B. et CAMBARDELLA, Cynthia A., 2020. Biological soil health indicators respond to tillage intensity: A US meta-analysis. *Geoderma*. juin 2020. Vol. 369, pp. 114335. DOI 10.1016/j.geoderma.2020.114335.

NYÉLÉNI, Mali, 2015. Declaration of the international forum for agroecology. *Development*. 2015. Vol. 58, pp. 163-168.

ORCHARD, Suzanne, STANDISH, Rachel J., DICKIE, Ian A., RENTON, Michael, WALKER, Christopher, MOOT, Derrick et RYAN, Megan H., 2017. Fine root endophytes under scrutiny: a review of the literature on arbuscule-producing fungi recently suggested to belong to the Mucoromycotina. *Mycorrhiza*. 1 octobre 2017. Vol. 27, n° 7, pp. 619-638. DOI 10.1007/s00572-017-0782-z.

PAVINATO, Paulo Sérgio et ROSOLEM, Ciro Antonio, 2008. Effects of organic compounds produced by plants on soil nutrient availability. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*. juin 2008. Vol. 32, pp. 911-920. DOI 10.1590/S0100-06832008000300001.

PEIGNÉ, Josephine et al, 2016. Test Bêche - Guide d'utilisation. . Décembre 2016.

PEIGNÉ, J., BALL, B. C., ROGER-ESTRADE, J. et DAVID, C., 2007. Is conservation tillage suitable for organic farming? A review. *Soil Use and Management*. juin 2007. Vol. 23, n° 2, pp. 129-144. DOI 10.1111/j.1475-2743.2006.00082.x.

PULIDO MONCADA, Mansonia, HELWIG PENNING, Letiane, TIMM, Luis Carlos, GABRIELS, Donald et CORNELIS, Wim M., 2014. Visual examinations and soil physical and hydraulic properties for assessing soil structural quality of soils with contrasting textures and land uses. *Soil and Tillage Research*. juillet 2014. Vol. 140, pp. 20-28. DOI 10.1016/j.still.2014.02.009.

PURAKAYASTHA, T.J., SMITH, J.L. et HUGGINS, D.R., 2009. Microbial biomass and N cycling under native prairie, conservation reserve and no-tillage in Palouse soils. *Geoderma*. septembre 2009. Vol. 152, n° 3-4, pp. 283-289. DOI 10.1016/j.geoderma.2009.06.013.

RAINELLI, Pierre, 1996. Pollution des sols, problèmes économiques. In : *Le sol, un patrimoine menacé ?* [en ligne]. Paris, France. 24 octobre 1996. [Consulté le 4 mai 2023]. Disponible à l'adresse : https://www.afes.fr/wp-content/uploads/2017/10/EGS_3_4_RAINELLI.pdf

RÉSEAU MARAÎCHAGE SOL VIVANT, 2021. Le Maraîchage Sol Vivant. *Maraîchage Sol Vivant Normandie* [en ligne]. 2021. [Consulté le 13 juillet 2023]. Disponible à l'adresse : <https://normandie.maraichagesolvivant.fr/le-maraichage-sol-vivant/>

ROGER-ESTRADE, Jean, LABREUCHE, Jérôme et BOIZARD, Hubert, 2014. Importance du travail du sol : typologie des modes de mise en oeuvre et effets sur le rendement des cultures. In : *Faut-il travailler le sol?* [en ligne]. Quae. pp. 11-25. [Consulté le 20 juillet 2023]. Disponible à l'adresse : <https://agroparistech.hal.science/hal-01619156>

SAADI, Sameh, TODOROVIC, Mladen, TANASIJEVIC, Lazar, PEREIRA, Luis S., PIZZIGALLI, Claudia et LIONELLO, Piero, 2015. Climate change and Mediterranean agriculture: Impacts on winter wheat and tomato crop evapotranspiration, irrigation requirements and yield. *Agricultural Water Management*. janvier 2015. Vol. 147, pp. 103-115. DOI 10.1016/j.agwat.2014.05.008.

SÄLE, Verena, AGUILERA, Paula, LACZKO, Endre, MÄDER, Paul, BERNER, Alfred, ZIHLMANN, Urs, VAN DER HEIJDEN, Marcel G.A. et OEHL, Fritz, 2015. Impact of conservation tillage and organic farming on the diversity of arbuscular mycorrhizal fungi. *Soil Biology and Biochemistry*. mai 2015. Vol. 84, pp. 38-52. DOI 10.1016/j.soilbio.2015.02.005.

SÉJALON-DELMAS, N et BÉCARD, G, 2021. *Impacts des pratiques agroécologiques sur les communautés mycorrhiziennes*. Synthèse finale du GT1, projet BAG'AGES.

SEKARAN, Udayakumar, SAGAR, Kavya Laxmisagara et KUMAR, Sandeep, 2021. Soil aggregates, aggregate-associated carbon and nitrogen, and water retention as influenced by short and long-term no-till systems. *Soil and Tillage Research*. avril 2021. Vol. 208, pp. 104885. DOI 10.1016/j.still.2020.104885.

SHARIFI, Mehdi, ZEBARTH, Bernie J., BURTON, David L., GRANT, Cynthia A., BITTMAN, Shabtai, DRURY, Craig F., MCCONKEY, Brian G. et ZIADI, Noura, 2008. Response of Potentially Mineralizable Soil Nitrogen and Indices of Nitrogen Availability to Tillage System. *Soil Science Society of America Journal*. juillet 2008. Vol. 72, n° 4, pp. 1124-1131. DOI 10.2136/sssaj2007.0243.

SHIPITALO, M-J., DICK, W-A. et EDWARDS, W-M., 2000. Conservation tillage and macropore factors that affect water movement and the fate of chemicals. *Soil and Tillage Research*. 2000. pp. 163-183. DOI 10.1016/S0167-1987(99)00104-X.

SINANAJ, Besiana, HOYSTED, Grace A., PRESSEL, Silvia, BIDARTONDO, Martin I. et FIELD, Katie J., 2021. Critical research challenges facing Mucoromycotina 'fine root endophytes'. *New Phytologist*. novembre 2021. Vol. 232, n° 4, pp. 1528-1534. DOI 10.1111/nph.17684.

SIRAMI, Clélia, THEAU, Jean Pierre et RYSCHAWY, Julie J., 2016. Services écosystémiques dans les agroécosystèmes : Définition. [en ligne]. 2016. [Consulté le 28 août 2023]. DOI 10.17180/G1QE-4S49. Disponible à l'adresse : <https://dicoagroecologie.fr/dictionnaire/services-ecosystemiques-dans-les-agroecosystemes/>

SO, H.B., GRABSKI, A. et DESBOROUGH, P., 2009. The impact of 14 years of conventional and no-till cultivation on the physical properties and crop yields of a loam soil at Grafton NSW, Australia. *Soil and Tillage Research*. juin 2009. Vol. 104, n° 1, pp. 180-184. DOI 10.1016/j.still.2008.10.017.

SOANE, Brennan D., BALL, Bruce C., ARVIDSSON, Johan, BASCH, Gottlieb, MORENO, Felix et ROGER-ESTRADE, Jean, 2012. No-till in northern, western and south-western Europe: A review of problems and opportunities for crop production and the environment. *Soil and Tillage Research*. 2012. Vol. 118, pp. 66-87.

TROUVELOT, A, KOUGH, J.L et GIANINAZZI-PEARSON, V, 1986. Mesure du taux de mycorrhization d'un système racinaire. Recherche de méthodes d'estimation ayant une signification fonctionnelle. *Physiological and genetical aspects of mycorrhizae*. 1986. pp. 217-221.

UNGER, P.W. et CASSEL, D.K., 1991. Tillage implement disturbance effects on soil properties related to soil and water conservation: a literature review. *Soil and Tillage Research*. mars 1991. Vol. 19, n° 4, pp. 363-382. DOI 10.1016/0167-1987(91)90113-C.

VIAN, Jean Francois, 2009. *Comparaison de différentes techniques de travail du sol en agriculture biologique: effet de la structure et de la localisation des résidus sur les microorganismes du sol et leurs activités de minéralisation du carbone et de l'azote*. AgroParisTech; Institut Supérieur d'Agriculture et d'Agroalimentaire Rhône

WALL, Diana H., NIELSEN, Uffe N. et SIX, Johan, 2015. Soil biodiversity and human health. *Nature*. décembre 2015. Vol. 528, n° 7580, pp. 69-76. DOI 10.1038/nature15744.

WEZEL, A., BELLON, S., DORÉ, T., FRANCIS, C., VALLOD, D. et DAVID, C., 2009. Agroecology as a science, a movement and a practice. A review. *Agronomy for Sustainable Development*. décembre 2009. Vol. 29, n° 4, pp. 503-515. DOI 10.1051/agro/2009004.

WHITE, Kathryn E., BRENNAN, Eric B., CAVIGELLI, Michel A. et SMITH, Richard F., 2020. Winter cover crops increase readily decomposable soil carbon, but compost drives total soil carbon during eight years of intensive, organic vegetable production in California. SNAPP, Sieglinde S. (éd.), *PLOS ONE*. 6 février 2020. Vol. 15, n° 2, pp. e0228677. DOI 10.1371/journal.pone.0228677.

WITTLING, Claire et RUELLE, Pierre, 2022. *Guide pratique de l'irrigation*. 4e Edition. Editions Quae. Hors collection.

Table des Annexes

Annexe 1 : Compost et broyats de déchets verts apportés

Annexe 2 : La rotation du dispositif, une réflexion basée sur de multiples critères

Annexe 3 : Engrais organiques apportés dans chaque modalité

Annexe 4 : Fiche descriptive observations VESS

Annexe 5 : Protocole du test de sédimentation des agrégats

Annexe 6 : Observation AMF selon la méthode Trouvelot et al. 1986

Annexe 7 : Résultats des analyses de sols du laboratoire LAS Arras INRAE, mars 2023

Annexe 8 : Résultats des indicateurs de la méthode Biofunctool® par modalité

Annexe 9 : Résultats de la dégradation de substrat par les organismes selon la profondeur par modalité

Annexe 10 : Résultats indice de santé des sols par individus statistiques

Annexe 11 : Résultats des indicateurs de l'observation des AMF par modalité

Annexe 12 : Rendements de fruits totaux par semaines de récolte et modalité

Annexe 13 : Efficience de l'irrigation par modalité

Annexe 14 : Résultats sondes Watermark

Annexe 1 : Compost et broyats de déchets verts apportés

Apports de compost depuis 2016 (en noir) et de broyats de déchets verts (en bleu) :

T-ref	T-NA	T-NAsup	NT
30 T.ha ⁻¹ en 2020	15 T.ha ⁻¹ en 2018	59 T.ha ⁻¹ en 2022	59 T.ha ⁻¹ en 2022
15 T.ha ⁻¹ en 2018	15 T.ha ⁻¹ en 2016	200 T.ha ⁻¹ en 2020	200 T.ha ⁻¹ en 2020
15 T.ha ⁻¹ en 2016		94 T.ha ⁻¹ en 2019	94 T.ha ⁻¹ en 2019
		15 T.ha ⁻¹ en 2018	

Composition compost de broyats de déchets verts 2020 :

RAPPORT D'ANALYSE

de matière fertilisante

ESTIMATION DE LA STABILITE BIOLOGIQUE

selon FD U 44-162 Juillet 2016



N° de laboratoire: 2043-101

Nature : Amendement organique NF U44-051

Intermédiaire: INRAE SBFC SRT (Facturation)

Date de réception: 23/10/2020

Date de début d'analyse :

Date d'édition :

INRAE UE Maraîchage Alénia

Mas Blanc

66200 ALENYA

Référence : 9

RESULTATS ANALYTIQUES

Composition générale

	% du brut	% du sec
Matière Sèche <small>NF EN 13040</small>	69,5	
Matière Organique <small>NF EN 13039</small>	38,0	54,7
Fraction Minérale	31,4	45,3

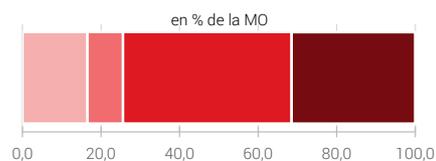
■ eau
■ matière organique
■ matière minérale



Fractionnement organique :

	% du brut	% du sec	% de la MO
Fraction Soluble	6,3	9,1	16,5
Hémicellulose	3,4	5,0	9,1
Cellulose	16,3	23,5	42,9
Lignine et Cutine	12,0	17,2	31,5

■ Fraction Soluble
■ Hémicellulose
■ Cellulose
■ Lignine et Cutine



Minéralisation du carbone :

carbone minéralisable à 3 jours 1,7%
(% de carbone minéralisé après 3 jours d'incubation)
selon FD U 44-163 Fev 2018

■ carbone minéralisable à 3j
■ non minéralisable à 3j



Calcul de l'Indice de Stabilité de la Matière Organique (ISMO)

Formule de l'ISMO :

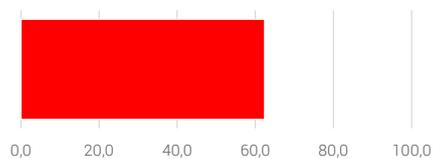
$$\text{ISMO} = 44,5 + (0,5 \times \text{SOL}) - (0,2 \times \text{CEL}) + (0,7 \times \text{LIC}) - (2,3 \times \text{ct3})$$

ISMO en % de la MO **62,3**

ISMO en kg/t de sec **341**

ISMO en kg/t de brut **237**

■ ISMO (% de MO)



Composition Broyats de déchets verts 2019 :



Version 44051- Auréa - 2015.1

Page 1 de 2

AMENDEMENT ORGANIQUE NF U 44-051

Réf échantillon : BROYAT VERT CRIBLE

DEMANDEUR	INTERMEDIAIRE
SYDETOM 66 NATUROPOLE BAT I/N9 3 BOULEVARD DE CLAI 66351 TOULOUGES CEDEX	SA SYDETOM 66 NATUROPOLE BAT I/N9 3 BOULEVARD DE CLAIRFONT /BP 5 66351 TOULOUGES CEDEX

Technicien : GIRONNE Paul

Nom de la station : MATIERE VEGETALE BROYEE

Commune : ST CYPRIEN

Date prélèvement : 17/04/2019

Date d'arrivée : 20/04/2019

Date de début d'analyse : 20/04/2019

Date d'édition : 05/06/2019

N° de commande :

Affaire :

Type : Matières végétales en mélange

Rapport d'analyse N° **PORL19061907**

CARACTERISATION DE LA VALEUR AGRONOMIQUE			Résultats exprimés sur		Critères NF U 44-051		Observations et paramètres calculés	
DETERMINATIONS	Symboles	Unités	sec	brut	Seuil de la norme	Conformité à la norme		
Matière sèche (NF EN 12880)	MS	%		81,7	≥ 30	Conforme		
Humidité (NF EN 12880)	H	%		18,3				
pH (M.I. selon NF EN 15933)				7,3				
Conductivité (M.I. selon NF EN 12176)	CE	mS.cm ⁻¹		0,72				
COMPOSITION DU PRODUIT								
Perte au feu de la M.S. (NF EN 12879)	MO	%	54,6	44,6	≥ 25	Conforme	C organique : 273 g.kg-1 de sec 223 g.kg-1 de brut	
Matières minérales (NF EN 12879)	MM	%	45,4	37,1				
Azote Kjeldahl (NF EN 13342)	NTK	%	1,40	1,14	< 3	Conforme	N organique : 1,22 % brut Rapport C/Norg : 18,2	
Azote global (NTK+N-NO _x)	NT	%	1,40	1,14				
Rapport MO/N organique				36,4			Rapport C/NT : 19,5 <i>Conforme</i> (Seuil de la norme > 8)*	
Azote ammoniacal	N-NH ₄	%	inf à 0,001	inf à 0,001	La norme s'applique par défaut sur le brut		(N-NO ₃ +N-NH ₄ +N _{ur}) / NT : Inf à 12,4 (%) <i>Conforme</i> (Seuil de la norme < 33 %)*	
Azote nitrique	N-NO ₃	mg.kg ⁻¹	inf à 12,2	inf à 10,00				
Azote uréique (M.I.- spectrophotométrie)	Nuréique	%	$< 0,07$	$< 0,06$				
NF EN 13650 & NF EN ISO 11885	Phosphore	P ₂ O ₅	%	0,50	0,41	< 3	Conforme	* Excepté pour les Amendements Organiques avec engrais L'expression des résultats en % est équivalente à l'expression en kg/Quintal. Pour convertir ces résultats en g/kg ou kg/T, il vous suffit de les multiplier par 10.
	Potassium	K ₂ O	%	1,03	0,84	< 3	Conforme	
	Magnésium	MgO	%	0,83	0,68			
	Calcium	CaO	%	6,22	5,08			
	Sodium	Na ₂ O	%	0,11	0,09			
Total Nt + P ₂ O ₅ + K ₂ O					2,39	< 7	Conforme	
Minéralisation eau réglée : NF EN 13650 Dosage des métaux : NF EN ISO 11885 (sauf AUREA 17-AME-17-011)	Chlorure	Cl	g.kg ⁻¹					<p>Norme NF U 44-051 Teneurs relatives, en % de la valeur limite</p>
	Soufre	SO ₃	%	0,50	0,41			
	Aluminium	Al	%					
	Fer	Fe	mg.kg ⁻¹			Valeurs limites		
	Manganèse	Mn	mg.kg ⁻¹					
	Chrome	Cr	mg.kg ⁻¹	12,0		120		
	Cuivre	Cu	mg.kg ⁻¹	44,8		300		
	Nickel	Ni	mg.kg ⁻¹	7,7		60		
	Zinc	Zn	mg.kg ⁻¹	106		600		
	Arsenic	As	mg.kg ⁻¹	6,0		18		
Cadmium	Cd	mg.kg ⁻¹	0,24		3			
Plomb	Pb	mg.kg ⁻¹	88,8		180			
Mercuré (ISO 16772)	Hg	mg.kg ⁻¹	0,06		2			
Sélénium	Se	mg.kg ⁻¹	inf à 0,5		12			
Molybdène	Mo	mg.kg ⁻¹						
Bore	B	mg.kg ⁻¹						
Cobalt	Co	mg.kg ⁻¹						

Le rapport ne concerne que les objets soumis à essai. Le rapport d'essai ne doit pas être reproduit partiellement sans l'approbation du laboratoire d'essai. La reproduction de ce rapport d'essai n'est autorisée que sous sa forme intégrale. Il comporte 2 pages. L'avis de conformité ne tient pas compte du calcul d'incertitudes de mesure, disponibles sur le site Internet du laboratoire (www.aurea.eu), rubrique "Incertitudes de mesure".

AUREA - ZI Chef de baie - 1 rue Champlain - 17074 La Rochelle Cedex 09 - Tél. 01 44 31 40 40 Fax 01 44 31 40 41 - contact@aurea.eu

www.aurea.eu

Annexe 2 : La rotation du dispositif une réflexion basée sur de multiples critères

Le choix des rotations à l'échelle de la parcelle est réfléchi pour correspondre aux objectifs fixés. Dans le cadre du projet TAI-Oc, le point sensible à contrôler est le développement de bioagresseurs telluriques : la rotation est alors diversifiée pour casser leur cycle de développement et ne pas atteindre un seuil d'infestation de rupture qui entraînerait un besoin de solarisation. Cette technique consiste à faire monter en température les couches superficielles du sol de la parcelle jusqu'à 40°C – voire plus de 50°C sous abris – sous l'effet du rayonnement solaire. En fin de solarisation, un travail du sol superficiel est nécessaire (Hirshy *et al.*, 2021). Cela perturberait alors fortement le dispositif. De plus, si la solarisation a un effet positif pour la gestion des bioagresseurs telluriques (e.g. certains nématodes) et de certaines adventices présentes sur les parcelles du site (e.g. chénopode blanc, mouron des champs), elle n'est pas sélective et impacte la biodiversité du sol dans son ensemble perturbant par exemple les populations microbiennes et de vers de terre (Hirshy *et al.*, 2021). La diversification a d'autres avantages : elle permet de favoriser la biodiversité associée c.à.d. la part de biodiversité qui colonise naturellement un agrosystème, de contrôler le développement des adventices et d'améliorer, un peu, la qualité des sols et les rendements (Haramoto, Gallandt, 2004). Sur l'unité expérimentale d'Alénya, le choix de la rotation se fait selon plusieurs critères parmi un panel d'espèces communément cultivées en maraîchage et pour lesquelles l'équipe du site dispose les compétences techniques.

Le **premier critère** est la diversité de la rotation au niveau de la famille : l'espèce implantée sur le cycle de l'année n appartient à une famille différente de celle implantée l'année n-1. Sur les cultures d'été, le choix se fait entre deux familles principales : celles des Solanacées et des Cucurbitacées. Selon les projets, des Fabacées peuvent être intégrées à la rotation mais les espèces maraîchères de cette famille requièrent un temps de travail long et ne peuvent pas être mises en place sur de grandes surfaces, les débouchés sont aussi limités. L'hiver, le choix se fait parmi un plus grand nombre de familles : Astéracées, Chenopodiacées, Apiacées, Brassicacées, Valériannacées et Alliées.

Le **deuxième critère** pris en compte dans le choix de la rotation est la diversification des espèces. L'espèce choisie en année n est une espèce non cultivée les 4 dernières années soit non cultivée lors de la dernière apparition de sa famille dans la rotation. Un critère de durée et répartition du cycle de la culture rentre aussi en compte : le cycle cultural doit être compatible avec les cultures qui suivent tout en laissant – selon les années – une durée suffisante pour l'implantation d'un engrais vert. Un cycle cultural trop long sur la culture d'été décalerait la mise en place de l'engrais vert et donc l'implantation de la culture d'hiver. Or, plus les légumes d'hiver sont implantés tard, moins ils sont commercialisables : à partir du mois de mars, les plants peuvent monter en fleurs, pourrir à cœur ou être touchés par des ravageurs de printemps (e.g. pucerons).

Enfin, d'autres critères sont considérés pour définir la rotation : la morphologie de la culture pour l'agencement spatial des espèces au sein d'une serre ; la densité de plantation pour limiter les variations complexifiant la mise en place des rangs ; la disponibilité de la main d'œuvre puisque certaines espèces nécessitent un palissage (concombre) et/ou des récoltes longues, régulières et fréquentes (haricot) ; les débouchés de commercialisation de la production pour assurer la vente des produits. Celle-ci n'est pas un critère primordial sur les essais expérimentaux financés sur projet mais rentre en compte sur les essais financés sur fond propre de l'unité.

Les engrais verts sont implantés tous les deux ans sur les parcelles, l'année sans engrais verts est l'année d'apport de matière organique. Le choix des engrais verts est lié à la rotation : en effet, les espèces choisies en engrais verts appartiennent à des familles non présentes dans la rotation. On retrouve des Polygonacées, des Graminées, des Hydrophyllacées, des Linacées et des Fabacées. Les Brassicacées intégrées aux couverts végétaux en grandes cultures (Haramoto, Gallandt, 2004) ne sont pas choisies en maraîchage puisqu'il s'agit d'espèces intégrées à la rotation des cultures de rente.

Les couverts choisis sont toujours plurispécifiques afin de favoriser la diversité botanique et d'avoir une bonne implantation du couvert même si une espèce du mélange ne trouve pas les conditions favorables pour germer. Il s'agit souvent d'une graminée couplée à une fabacée. Les fonctions de l'engrais vert recherchées sont : un système racinaire puissant pour aider à la décompaction du sol et ainsi favoriser l'aération de ce dernier – notamment en sol non travaillé où le sol a tendance à prendre en masse, défavorisant la croissance des racines de la culture suivante –, la structuration du sol, l'apport d'azote et la couverture du sol pour lutter contre les adventices. De plus, face aux conditions de sécheresse météorologique et de restriction d'eau, les espèces du couvert doivent être résistantes à la sécheresse édaphique pour assurer un développement suffisant sans apport d'eau conséquent au-delà de la phase d'implantation. Un développement suffisant correspond à celui permettant l'expression des fonctions attendues.

D'autres critères sont considérés : la durée d'interculture entre le cycle d'été et d'hiver, la destruction du couvert, le prix des semences et le conditionnement des semences. Ce dernier critère n'est pas anodin : les semences d'engrais verts sont parfois vendues en gros sacs de 20 kg. Si cela correspond aux besoins des engrais verts implantés en grandes cultures, cela ne correspond pas à ceux des systèmes maraîchers (plus petites surfaces et grande diversité d'engrais verts implantés en maraîchage).

Annexe 3 : Engrais organiques apportés dans chaque modalité

Vio Orga N13 :

Les engrais organiques VIO® Orga permettent d'améliorer la vie microbienne du sol, tout en apportant des éléments de nutrition azotée aux cultures. Elaborés avec des matières premières sélectionnées pour l'efficacité de leur cinétique de minéralisation, les engrais VIO® Orga permettent des apports d'azote organique ciblés en fonction des besoins des cultures et du sol.

VIO® Orga - N13 | ENGRAIS NF U 42-001/A10- Engrais organique NP

Produit utilisable en agriculture biologique conformément au règlement (CE) n°834/2007

Vigne	Maraiçage	Arboriculture	Grandes cultures	Espaces verts

MATIÈRES PREMIÈRES

- Poudre de viande
- Farine de sang
- Farine de plume

CONDITIONNEMENT

- Big bag-450 kg
- Vrac

CARACTÉRISTIQUES TECHNIQUES

- Fertilisant : Type 2
- Calibre bouchons : 4,5 mm
- Densité produit : 0,65 (+ ou - 0,01)

Nous contribuons au financement du programme ADIVALOR pour la collecte et le recyclage des big bags.



Fabriqué en France. Facile à stocker et à épandre, sans odeur. L'accès aux animaux d'élevage aux pâturages est interdit. L'utilisation des récoltes comme fourrage est interdite pendant au moins 21 jours après application. Sous produits animaux de catégorie 2 et/ou 3 non destinés à la consommation humaine et animale. Interdit pour l'alimentation animale, ne pas stocker à proximité d'aliments pour animaux d'élevage. Ne pas ingérer, se laver et se sécher les mains après usage.

CONTACT

27 ZAE La Gouinière
79380 La Forêt sur Sèvre
Tél : 05 49 80 74 02 - contact@violleau.fr

Part of Tessenenderlo Group

ÉLÉMENTS DÉCLARABLES DANS LA NORME NF U 42-001/A10(% sur produit brut)

VIO® Orga - N13	
Azote (N) total	13 %
dont N organique	13 %
Anhydride phosphorique (P ₂ O ₅)	2 %

ÉLÉMENTS NON DÉCLARABLES DANS LA NORME NF U 42-001/A10(% sur produit brut)

VIO® Orga - N13	
Matière sèche	90 %
Matière organique	80 %
C/N	3
ESMO	-
Oxyde de calcium (CaO)	3 %
Oxyde de magnésium (MgO)	-
Anhydride sulfurique (SO ₂)	2 %
Cuivre (Cu)	6 g/T
Bore (B)	-
Zinc (Zn)	80 g/T
Manganèse (Mn)	10 g/T

VIOLLEAU
AGRICULTURE BIOLOGIQUE

FFB270 - Septemb

Orgaliz CV :

Terrial
www.terrial.fr

ORGALIZ CV+

7 - 4 - 11 + 2 MgO

Engrais NF U 42-001
Engrais organo-minéral NPK



Facilité d'épandage

Libération progressive des unités fertilisantes



AVANTAGES



Respect de l'environnement



Equilibre adapté aux exigences de la culture



Riche en oligo-éléments



Fabrication FRANÇAISE



COMPOSITION

ELEMENTS NUTRITIFS (% sur produit brut)				OLIGO-ELEMENTS	
MS	90 %	Azote (N) total	7 %	Oligo-éléments totaux (Fe, B, Zn, Mn, Mo) en teneurs non garanties.	
		dont Azote organique	7 %		
MO	53 %	Anhydride phosphorique (P₂O₅) total	4 %	Seules sont garanties les valeurs NPK, CaO, SO ₃ et MgO	
C/N	3,9	Oxyde de potassium (K₂O) sol eau	11 %		
ISMO (en % MO)	14,2	Oxyde de calcium (CaO) total	7 %	AUTRES PARAMETRES Exempt de boues de stations et de déchets végétaux urbains.	
		Anhydride sulfurique (SO ₃) total	7 %		
		Oxyde de magnésium (MgO) total	2 %		

MATIERES PREMIERES : Composé de matières organiques d'origine animale (Poudre de viande) et de compléments d'origine minérale (dont cendres végétales).

Produit autorisé en Agriculture Biologique, conformément à la réglementation européenne en vigueur.



CONSEILS D'UTILISATION

800 kg à 1,5 T / ha
Consultez votre technicien pour des préconisations adaptées.



CONDITIONNEMENT

Sac, big bag.

*Produit en vrac : non destiné à la fertilisation de sols destinés à fournir des fourrages (pâtures et cultures fourragères) pour les animaux d'élevage.
Produit conditionné (< 1T) : non destiné à la fertilisation de prairies auxquelles les animaux d'élevage ont accès directement. Pour la culture fourragère, respecter un délai de 21 jours minimum entre l'application du produit et la récolte.
Sous produits animaux de catégorie 2 et/ou 3, non destinés à la consommation humaine et animale.
Interdit pour l'alimentation animale, ne pas stocker à proximité d'aliments pour animaux d'élevage.*

2 avenue de Ker Lann - 35170 Bruz | 02 23 46 97 00 | www.terrial.fr

V.10-09-2020

Annexe 4 : Fiche descriptive observations VESS I Source : Guimarães *et al.*, 2011

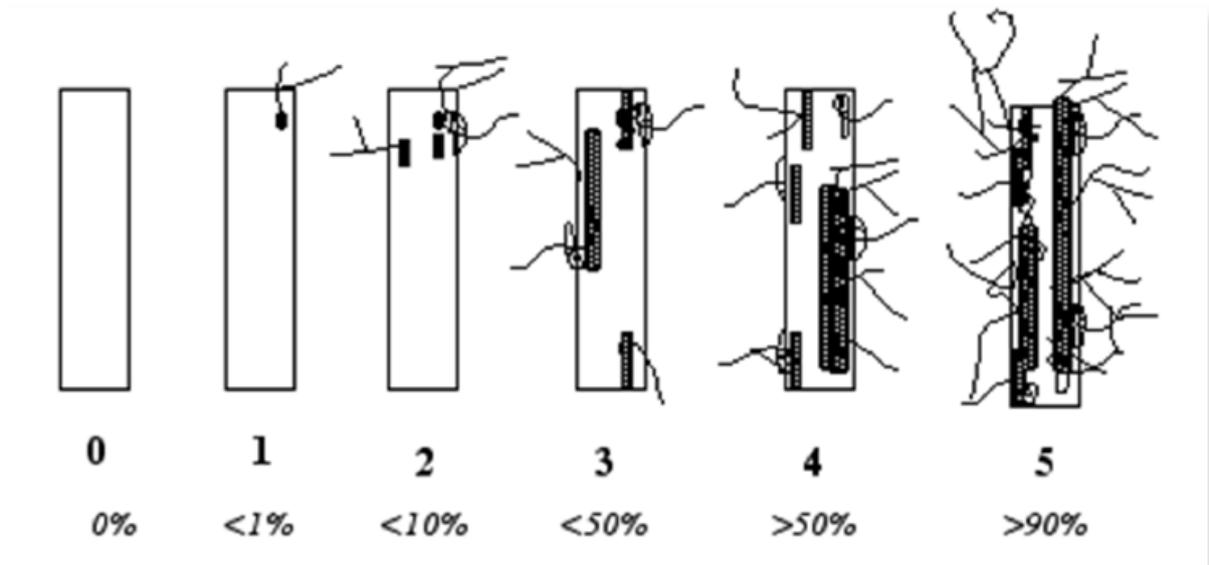
Structure quality	Size and appearance of aggregates	Visible porosity and Roots	Appearance after break-up: various soils	Appearance after break-up: same soil different tillage	Distinguishing feature	Appearance and description of natural or reduced fragment of ~ 1.5 cm diameter
Sq1 Friable Aggregates readily crumble with fingers	Mostly < 6 mm after crumbling	Highly porous Roots throughout the soil			 Fine aggregates	 The action of breaking the block is enough to reveal them. Large aggregates are composed of smaller ones, held by roots.
Sq2 Intact Aggregates easy to break with one hand	A mixture of porous, rounded aggregates from 2 mm –7 cm. No clods present	Most aggregates are porous Roots throughout the soil			 High aggregate porosity	 Aggregates when obtained are rounded, very fragile, crumble very easily and are highly porous.
Sq3 Firm Most aggregates break with one hand	A mixture of porous aggregates from 2 mm –10 cm; less than 30% are <1 cm. Some angular, non-porous aggregates (clods) may be present	Macropores and cracks present. Porosity and roots both within aggregates.			 Low aggregate porosity	 Aggregate fragments are fairly easy to obtain. They have few visible pores and are rounded. Roots usually grow through the aggregates.
Sq4 Compact Requires considerable effort to break aggregates with one hand	Mostly large > 10 cm and sub-angular non-porous; horizontal/platy also possible; less than 30% are <7 cm	Few macropores and cracks All roots are clustered in macropores and around aggregates			 Distinct macropores	 Aggregate fragments are easy to obtain when soil is wet, in cube shapes which are very sharp-edged and show cracks internally.
Sq5 Very compact Difficult to break up	Mostly large > 10 cm, very few < 7 cm, angular and non-porous	Very low porosity. Macropores may be present. May contain anaerobic zones. Few roots, if any, and restricted to cracks			 Grey-blue colour	 Aggregate fragments are easy to obtain when soil is wet, although considerable force may be needed. No pores or cracks are visible usually.

Annexe 5 : Protocole du test de sédimentation des agrégats

Rédacteur : N. Rakotondrazafy Vérificateurs : A. Brauman A .Thoumazeau	Stabilité des agrégats	Créé : le 18/05/2020
	Maintien de la structure	

	Score	Observation
A la pose:	0	Destruction totale (agrégat trop instable pour rester dans le tamis)
Après 5s:	1	50% de l'agrégat est détruit après 5s dans l'eau
Après 30s:	2	50% de l'agrégat est détruit après 30s dans l'eau
Après 5min:	3	50% de l'agrégat est détruit après 5min, ou <10% du sol reste sur le tamis après 5 aller-retours dans l'eau
	4	Entre 10 et 25% du sol reste sur le tamis après 5 aller-retours dans l'eau
	5	Entre 25 et 75% du sol reste sur le tamis après 5 aller-retours dans l'eau
	6	Entre 75 et 100% du sol reste sur le tamis après 5 aller-retours dans l'eau

Annexe 6 : Observation AMF selon la méthode Trouvelot et al. 1986



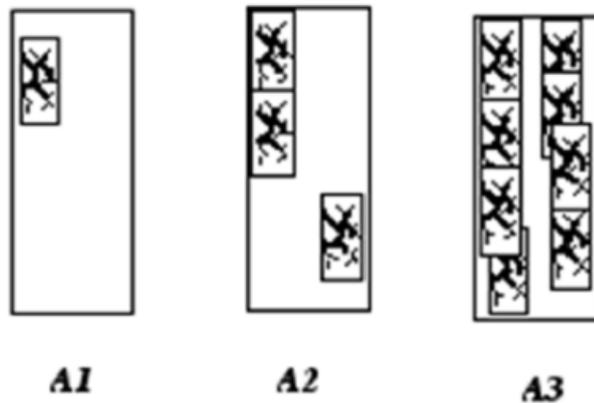
Notation de l'infection mycorhizienne au sein d'un fragment en classes notées de 0 à 5

None : A0

Few arbuscules : A1

Frequent : A2

Abundant : A3



Notation de la richesse en arbuscules au sein de la zone mycorhizée en classes notées de 0 à 3

Annexe 7 : Résultats des analyses de sols du laboratoire LAS Arras INRAE, mars 2023

	T-ref	T-NA	T-NA ^{sup}	NT
Argiles ($g.kg^{-1}$)	192,3 ± 5,9	197,2 ± 4,3	190,0 ± 5,7	198,6 ± 1,1
Argiles (%)	19,2 ± 5,9	19,7 ± 4,3	19,0 ± 5,7	19,8 ± 1,1
Limons fins ($g.kg^{-1}$)	291,7 ± 12,4	307,8 ± 7,1	284,6 ± 10,4	310,8 ± 3,4
Limons grossiers ($g.kg^{-1}$)	171,7 ± 1,5	178,0 ± 3,9	215,8 ± 5,9	203,4 ± 6,8
Limons totaux (%)	46,3 ± 3,7	48,6 ± 3,3	50,0 ± 4,0	51,4 ± 3,2
Sables fins ($g.kg^{-1}$)	206,3 ± 21,4	190,4 ± 11,3	196,4 ± 18,5	173,0 ± 3,2
Sables grossiers ($g.kg^{-1}$)	138,0 ± 6,6	126,6 ± 4,0	113,2 ± 4,4	114,2 ± 9,6
Sables totaux (%)	34,4 ± 5,3	31,7 ± 3,9	31,0 ± 4,8	28,7 ± 3,6
pH	7,8 ± 0,1	8,0 ± 0,1	8,0 ± 0,1	8,0 ± 0,0
CEC ($cmol^+.kg^{-1}$)	13,8 ± 0,2	13,4 ± 0,1	17,9 ± 0,9	18,7 ± 1,8
Calcium ($cmol^+.kg^{-1}$)	14,7 ± 0,8	14,6 ± 0,4	18,2 ± 0,7	19,9 ± 2,2
Phosphore ($g.kg^{-1}$)	0,0194 ± 0,0	0,0132 ± 0,0	0,0323 ± 0,0	0,0434 ± 0,0
Potassium ($cmol^+.kg^{-1}$)	1,1088 ± 0,1	1,1021 ± 0,1	1,0399 ± 0,1	1,0492 ± 0,2
Magnésium ($cmol^+.kg^{-1}$)	2,4 ± 0,2	1,8 ± 0,1	2,9 ± 0,1	3,0 ± 0,3

Annexe 8 : Résultats des indicateurs de la méthode Biofunctool® par modalité, campagne de mesures de mars 2023

Résultats moyens ± écart-type et ANOVA :

Indicateur	T-ref	T-NA	T-NA ^{sup}	NT	P-value
<i>POXC</i> ($mgC/kg_{sol\ sec}$)	752 ± 54 a	745 ± 43 a	904 ± 26 b	843 ± 43 b	4,53e ^{-5*}
<i>Situresp</i>	0,570 ± 0,153 a	0,537 ± 0,104 a	0,685 ± 0,027 a	0,652 ± 0,187 a	0,18
<i>Bait lamina</i> (%deg.jour ⁻¹)	1,58 ± 0,94 a	2,80 ± 1,23 ab	3,56 ± 0,92 b	3,16 ± 0,48 b ·	0,022*
<i>Nmin</i> ($mgNO_3.kg^{-1}_{sol}$)	28 ± 2 a	28 ± 5 a	53 ± 21 b	61 ± 13 b	0,0023*
<i>Ag_Surf</i>	3,44 ± 0,65 a	4,78 ± 0,58 b	5,03 ± 0,50 b	4,87 ± 0,49 b	0,0013*
<i>Ag_Prof</i>	3,44 ± 0,58 a	4,15 ± 0,42 a	3,89 ± 0,30 a	3,76 ± 0,97 a	0,16
<i>VESS</i>	2,51 ± 0,30 a ·	2,69 ± 0,44 a ·	3,03 ± 0,10 a ·	3,12 ± 0,13 a ·	0,011*
<i>Beerkan</i>	920 ± 172 a	630 ± 597 a	398 ± 260 a	672 ± 256 a	0,20

Les valeurs par modalité sont des moyennes (n=5) ± écart-types. Les moyennes ayant une lettre différente présentent des différences significatives d'après le test paramétrique de comparaisons multiples HSD Tukey ou le test non paramétrique de Wilcoxon. * Différence significative P-value (P) < 0,05 ; · Différence presque significative 0,05 < P < 0,1. I Breton, 2023

Valeurs brutes :

Modalité	ZAD	DA_10cm	DA_30cm	Hum_sol	Nmin	POXC	Situresp	Bait_lamina	VESS	Ag_Surf	Ag_Prof	Beerkan
T-ref	A	1,36	1,47	17,0	25,3	719,5	0,458	1,79	2,05	3,00	3,00	920
T-ref	B	1,43	1,47	16,9	26,5	791,4	0,531	1,42	2,63	4,50	4,38	908
T-ref	C	1,38	1,41	17,2	30,2	678,9	0,634	3,07	2,52	3,44	3,45	683
T-ref	D	1,25	1,54	14,3	30,3	813,2	0,424	0,67	2,52	3,44	3,45	1169
T-ref	E	1,36	1,47	15,8	27,4	757,0	0,804	0,95	2,87	2,83	2,95	920
T-NA	A	1,31	1,58	16,1	21,5	750,8	0,582	2,96	3,23	5,30	4,83	630
T-NA	B	1,26	1,64	17,3	25,4	769,5	0,509	4,05	2,00	3,83	3,83	1487
T-NA	C	1,30	1,47	18,5	27,1	741,3	0,523	1,31	2,69	4,78	4,15	888
T-NA	D	1,38	1,64	16,4	33,7	675,8	0,677	1,79	2,69	4,78	4,15	95
T-NA	E	1,31	1,58	16,8	31,2	788,3	0,394	3,91	2,83	5,20	3,80	48
T-NA ^{sup}	A	1,61	1,60	20,3	43,9	928,3	0,692	3,88	3,12	5,24	3,83	398
T-NA ^{sup}	B	1,69	1,61	22,6	49,1	922,7	0,686	2,62	3,10	5,61	4,33	810
T-NA ^{sup}	C	1,54	1,58	22,9	46,7	869,5	0,656	3,04	3,03	5,03	3,89	397
T-NA ^{sup}	D	1,60	1,60	23,7	36,7	882,0	0,665	3,27	3,03	5,03	3,89	288
T-NA ^{sup}	E	1,61	1,60	24,0	89,5	916,4	0,725	4,99	2,88	4,23	3,50	99
NT	A	1,56	1,56	21,7	66,4	853,9	0,357	3,71	3,20	4,27	3,11	672
NT	B	1,53	1,57	21,6	43,4	769,5	0,623	3,10	3,23	5,63	5,33	466
NT	C	1,54	1,54	23,4	60,3	851,1	0,837	2,90	3,12	4,87	3,76	959
NT	D	1,59	1,56	23,6	56,6	881,6	0,787	2,54	3,12	4,87	3,76	372
NT	E	1,56	1,56	23,7	80,0	860,2	0,655	3,57	2,91	4,70	2,83	893

Annexe 9 : Résultats de la dégradation de substrat par les organismes selon la profondeur (0,5 cm entre chaque trou du bait lamina) par modalité

%deg.jour ⁻¹	T-ref	T-NA	T-NAsup	NT
Trou 1	2,59 <i>a</i>	3,48 <i>ab</i>	5,27 <i>b</i>	5,33 <i>b</i>
Trou 2	2,32 <i>a</i>	3,13 <i>a</i>	5,27 <i>b</i>	5,42 <i>b</i>
Trou 3	1,96 <i>a</i>	3,30 <i>ab</i>	4,82 <i>b</i>	4,78 <i>b</i>
Trou 4	1,70 <i>a</i>	3,04 <i>ab</i>	4,38 <i>b</i>	3,88 <i>ab</i>
Trou 5	1,61 <i>a</i>	2,95 <i>ab</i>	4,46 <i>b</i>	3,68 <i>ab</i>
Trou 6	1,52 <i>a</i>	2,77 <i>ab</i>	3,84 <i>b</i>	3,60 <i>b</i>
Trou 10	1,52 <i>a</i>	2,77 <i>a</i>	2,95 <i>a</i>	2,59 <i>a</i>
Trou 13	1,07 <i>a</i>	2,14 <i>a</i>	2,59 <i>a</i>	2,29 <i>a</i>
Trou 16	0,98 <i>a</i>	2,41 <i>a</i>	2,23 <i>a</i>	1,68 <i>a</i>

Les valeurs par modalité sont des moyennes (n=5) ± écart-types. Les moyennes ayant une lettre différente présentent des différences significatives d'après le test paramétrique de comparaisons multiples HSD Tukey ou le test non paramétrique de Wilcoxon. I Breton, 2023

Annexe 10 : Résultats indice de santé des sols par individus statistiques

Modalité	ZAD	Dynmique du Carbone	Recyclage des nutriments	Maintien de la structure	SHI Total
T-ref	A	0,240	0,334	0,045	0,619
T-ref	B	0,253	0,327	0,047	0,627
T-ref	C	0,304	0,293	0,054	0,651
T-ref	D	0,215	0,334	0,054	0,603
T-ref	E	0,283	0,279	0,049	0,610
T-NA	A	0,302	0,291	0,038	0,631
T-NA	B	0,324	0,406	0,045	0,775
T-NA	C	0,241	0,325	0,048	0,614
T-NA	D	0,273	0,258	0,060	0,591
T-NA	E	0,302	0,246	0,055	0,603
T-NAsup	A	0,375	0,264	0,078	0,716
T-NAsup	B	0,336	0,309	0,087	0,732
T-NAsup	C	0,335	0,265	0,083	0,683
T-NAsup	D	0,345	0,256	0,065	0,666
T-NAsup	E	0,412	0,233	0,159	0,803
NT	A	0,299	0,263	0,118	0,680
NT	B	0,316	0,287	0,077	0,680
NT	C	0,360	0,306	0,107	0,773
NT	D	0,345	0,256	0,101	0,702
NT	E	0,349	0,296	0,142	0,787

**Annexe 11 : Résultats des indicateurs de l'observation des AMF par modalité,
campagne de mesures de mars 2023**

Indicateur	T-ref	T-NA	T-NA ^{sup}	NT
F%	80,2 ± 10,7 a	86,4 ± 8,3 a	59,6 ± 10,2 b	43,2 ± 7,7 b
M%	29,0 ± 8,5 a	39,40 ± 14,5 a	21,8 ± 12,7 ab	8,92 ± 4,1 b
m%	35,6 ± 7,9 a	45,2 ± 13,4 a	35,4 ± 16,3 a	20,6 ± 10,5 a
a%	77,6 ± 7,2 a	77,4 ± 11,3 a	68,4 ± 8,6 a	61,8 ± 25,6 a
v%	8,6 ± 4,6 a	10,7 ± 4,3 a	7,8 ± 3,7 a	9,5 ± 9,2 a

Les valeurs par modalité sont des moyennes (n=5) ± écart-types. Les moyennes ayant une lettre différente présentent des différences significatives d'après le test paramétrique de comparaisons multiples HSD Tukey ou le test non paramétrique de Wilcoxon. I Breton, 2023.

Annexe 12 : Rendements de fruits totaux (commercialisable et déchets) par semaines de récolte et modalité – 2 récoltes la première semaine, 3 récoltes par semaine les suivantes

Rendements en kg.m ⁻²	T-ref	T-NA	T-NA ^{sup}	NT
S1	0,25 ± 0,11 a	0,16 ± 0,09 a	0,33 ± 0,15 ab	0,76 ± 0,30 b
S2	2,26 ± 0,33 a	2,00 ± 0,06 a	2,48 ± 0,36 a	2,46 ± 0,20 a
S3	2,03 ± 0,17 a	2,05 ± 0,19 a	2,49 ± 0,38 a	2,48 ± 0,26 a
S4	1,79 ± 0,75 a	0,99 ± 0,03 a	1,78 ± 0,35 a	1,18 ± 0,16 a
S5	0,74 ± 0,06 a	0,39 ± 0,21 a	0,57 ± 0,27 a	0,76 ± 0,16 a
Total	7,08 ± 0,67 ab	5,59 ± 0,49 a	7,64 ± 0,83 b	7,62 ± 0,37 b
Taux de non commercialisation (%)	13,36 ± 1,10 a	10,54 ± 1,26 a	11,63 ± 2,29 a	9,46 ± 2,50 a

Les valeurs par modalité sont des moyennes (n=3) ± écart-types. Les moyennes ayant une lettre différente présentent des différences significatives d'après les tests paramétriques ou non paramétriques. I Breton, 2023

Annexe 13 : Efficience de l'irrigation par modalité

Irrigation	T-ref	T-NA	T-NAsup	NT
Cumuls d'eau totaux (mm)	5,30	5,17	5,23	5,55
Efficience de l'irrigation (kg.L⁻¹)	1,34 ± 0,13 ab	1,08 ± 0,09 a	1,46 ± 0,16 b	1,37 ± 0,07 ab

Les valeurs des cumuls d'irrigation sont les valeurs rapportées à l'échelle de la ZAD. Les valeurs de l'efficience de l'irrigation sont les valeurs par modalité, ce sont des moyennes (n=3) ± écart-types. Les moyennes ayant une lettre différente présentent des différences significatives d'après les tests paramétriques ou non paramétriques. I Breton, 2023

Annexe 14 : Résultats sondes Watermark

Potentiel hydrique cbar	T-ref	T-NA	T-NAsup	NT
17/05 13h	22,3 ± 14,2	12,0 ± 15,9	16,0 ± 11,4	25,0 ± 20,1
17/05 17h	21,3 ± 12,4	13,0 ± 15,4	16,7 ± 12,1	28,33 ± 13,6
17/05 21h	17,3 ± 3,8	11,3 ± 17,1	15,3 ± 12,7	30,0 ± 9,2
18/05 1h	16,7 ± 0,6	11,0 ± 17,3	16,0 ± 11,5	30,0 ± 8,0
18/05 5h	16,7 ± 2,1	11,7 ± 17,6	17,7 ± 10,1	28,7 ± 7,5

Les valeurs par modalité sont des moyennes (n=3) ± écart-types. I Breton, 2023

Évaluation multicritère de systèmes maraîchers basés sur la réduction du travail du sol associée à des apports massifs de matière organique

Multi-criteria assessment of market gardening systems based on tillage reduction combined with massive organic matter inputs

Mots-clés : maraîchage, non travail du sol, matière organique, santé des sols, dynamique de l'eau
Key-words : market gardening, no till, organic matter, soil health, water dynamic

Résumé :

Le travail du sol et les apports de matière organique (MO) sont deux facteurs impactant fortement les systèmes de cultures : ils modifient la structure du sol, la localisation des nutriments dans le profil, les communautés biologiques, la dynamique de l'eau etc. En 2023, l'unité expérimentale Maraîchage d'Alénia (66) a mis en place le dispositif SMART-Sol visant à étudier en sols limono-sableux l'impact de la réduction du travail du sol associée à des apports massifs de MO sur la santé des sols, les performances agronomiques et la dynamique de l'eau dans le sol. Quatre systèmes maraîchers sous abris en agriculture biologique sont étudiés. Il s'agit de T-ref : travail profond et animé associé à 30 T.ha⁻¹ de compost (en année n-2), T-NA : travail profond et non animé, pas de compost en n-2, T-NAsup : travail superficiel non animé, et 200 T.ha⁻¹ de compost (n-2) et NT : non travail du sol et 200 T.ha⁻¹ de compost (n-2). La santé des sols a été évaluée par la méthode Biofunctool[®] ; le suivi hydrique réalisé par des sondes TDR (Time Domain Reflectometry). Le premier cycle cultural implanté en concombre a montré un meilleur indice de santé des sols pour les modalités T-NAsup et NT. Ces systèmes ont également une bonne performance agronomique (rendement) et des sols tamponnant les apports d'eau avec des vitesses d'humidification et d'assèchement a priori plus lentes. T-NAsup est un système particulièrement efficace en eau. Les modalités T-ref et T-NA présentent les taux de mycorhization les plus élevés (endomycorhizes à arbuscules).

Abstract :

Tillage and organic matter (OM) inputs have a major impact on cropping systems by modifying soil structure, nutrients repartition in the soil profile, biological communities, water dynamics etc. In 2023, the experimental unit specialized in market gardening in Alénia (66) set up a test pattern called SMART-Sol that aims to study on sandy loams the impact of tillage reduction combined with OM massive inputs on soil health, agronomic performance and water dynamics in the soil. Four sheltered organic market gardening systems are being studied. These are T-ref : deep, animated tillage combined with 30 T.ha⁻¹ of compost (in year - 2), T-NA : non-animated tillage, no compost in y-2, T-NAsup : shallow, non-animated systems, 200 T.ha⁻¹ of compost (y-2) and NT : no-till and 200 T.ha⁻¹ of compost (n-2). Soil health was assessed using the Biofunctool[®] method ; water monitoring was carried out using TDR (Time Domain Reflectometry) sensors. The first crop cycle planted with cucumber showed a better soil health index for T-NAsup and NT modalities. Both systems also get good agronomic performance (yield) and soils that buffer water inputs, with a priori slower moistening and drying rates. T-NAsup is a particularly water-efficient system. T-ref and T-NA showed the highest mycorrhization rates (arbuscular endomycorrhizal fungi).

Nombre de pages du document final : 95

<p>Demandeur (entreprise, organisme...) : INRAE CENTRE OCCITANIE MONTPELLIER</p>
--