



RAPPORT DE STAGE

(NOM prénom) : BESSADET Théo

Dans le cadre du stage de **2^e année** :

Stage effectué du (jj/mm/aa) : 30/06/2025 au 30/12/2025

À : **INRAE UE Maraîchage - 66200 Alénia - Route de Théza**

Sur le thème : Effets de la traction animale sur la santé des sols en maraîchage – suivi d’indicateurs biologiques, physiques et hydrophysique.

Eventuellement, rapport confidentiel : ☐

Date d’expiration de confidentialité :

.....

Enseignant référent responsable : Mr EL OUAAMARI Samir

Enseignant référent associé :

Dans ce cas fournir un 2^e exemplaire du rapport

Maître de stage : Mdm GUILLOT Esther - Mdm BOIVIN Fabienne

Engagement de non-plagiat

❶ Principes

- Le plagiat se définit comme l'action d'un individu qui présente comme sien ce qu'il a pris à autrui.
- Le plagiat de tout ou parties de documents existants constitue une violation des droits d'auteur ainsi qu'une fraude caractérisée
- Le plagiat concerne entre autres : des phrases, une partie d'un document, des données, des tableaux, des graphiques, des images et illustrations.
- Le plagiat se situe plus particulièrement à deux niveaux : Ne pas citer la provenance du texte que l'on utilise, ce qui revient à le faire passer pour sien de manière passive. Recopier quasi intégralement un texte ou une partie de texte, sans véritable contribution personnelle, même si la source est citée.

❷ Consignes

- Il est rappelé que la rédaction fait partie du travail de création d'un rapport ou d'un mémoire, en conséquence lorsque l'auteur s'appuie sur un document existant, il ne doit pas recopier les parties l'intéressant mais il doit les synthétiser, les rédiger à sa façon dans son propre texte.
- Vous devez systématiquement et correctement citer les sources des textes, parties de textes, images et autres informations reprises sur d'autres documents, trouvés sur quelque support que ce soit, papier ou numérique en particulier sur internet.
- Vous êtes autorisés à reprendre d'un autre document de très courts passages in extenso, mais à la stricte condition de les faire figurer entièrement entre guillemets et bien sûr d'en citer la source.

❸ Sanction

En cas de manquement à ces consignes, la DEVE/le correcteur se réserve le droit d'exiger la réécriture du document sans préjuger d'éventuelles sanctions disciplinaires.

❹ Engagement

Je soussigné (e) BESSADET Théo

reconnais avoir lu et m'engage à respecter les consignes de non-plagiat.

A Alénia le 22/08/2025

Signature : BESSADET Théo

Cet engagement de non plagiat doit être inséré en début de tous les rapports, dossiers, mémoires.

Remerciement

Je voudrais adresser un grand merci à toutes les personnes qui ont contribué à ce rapport, que ce soit dans l'encadrement, les conseils sur les questions scientifiques ou l'ensemble des autres étapes de ce travail.

Mes remerciements vont bien évidemment en premier lieu à mes encadrantes de stage, Esther et Fabienne, qui m'ont accueilli et guidé tout au long de ces six mois, aujourd'hui déjà terminés. J'ai pu bénéficier d'une grande liberté et de la confiance que vous m'avez accordée, ce qui m'a permis d'être rapidement à l'aise et de me sentir pleinement intégré au projet. Grâce à cette expérience, j'ai pu réellement découvrir le monde de la recherche et, si un jour je venais à envisager une thèse, vous auriez indéniablement contribué à cette décision.

Je tiens également à remercier toute l'équipe de l'unité, qui m'a chaleureusement accueilli dès mon arrivée et accompagné dans la découverte de nombreuses techniques. J'espère sincèrement avoir un jour l'occasion de retravailler avec une équipe aussi enrichissante.

J'ai aussi une pensée pour l'équipe d'Avignon, où j'ai rencontré des personnes avec lesquelles j'ai pu avoir des échanges plus ou moins fréquents, mais toujours aussi intéressants. Je pense notamment à Annette, avec qui j'ai pu échanger à de nombreuses reprises et qui a souvent su me conseiller.

Je remercie également mon professeur référent, Samir El Ouaamari, qui m'a suivi et s'est montré à l'écoute tout au long de ce stage.

Enfin, je souhaite adresser un mot à l'ensemble des personnes rencontrées à l'occasion de ce stage. J'ai pu entrevoir des domaines que je connaissais encore très peu auparavant, et cette expérience m'a beaucoup apporté, tant sur le plan scientifique que personnel.

Et bien sûr un grand merci au GIS PIClég qui a rendu ce stage possible par son financement.

RAPPORT DE STAGE	0
Abstract	5
1) Introduction	6
a) Contexte global	6
b) Context du stage	6
2) Etat de l'art	8
3) Matériel et Méthodes	11
a) Dispositif expérimental	11
c) Indicateurs de suivis et protocoles de mesure	12
d) Collecte, saisie et organisation des données	15
e) Mise en place d'un SHI et intégration des résultats	16
f) Normalisation de la mesure de pénétrométrie	17
4) Résultats obtenus	18
a) Jeux de données et calendrier d'échantillonnage	18
b) Présentation des données brutes (campagnes T0 - T1 - T2)	19
c) Données encore non analysables	25
5) Discussion et Analyse critique	26
a) Rappel des objectifs et hypothèses opérationnelles	26
b) Lecture transversale des résultats (T0, T1 et T2)	26
c) Analyse statistique et scoring	27
d) Incertitudes et biais possibles	31
e) Impacts organisationnels & agronomique	32
6) Perspectives d'évolution	33
7) Conclusion	36
8) Bibliographie et Annexes	37
a) Bibliographie	37
b) Annexe	41

Abstract

Soil compaction is a major constraint in vegetable cropping systems, particularly in Mediterranean regions where sandy loam soils are highly sensitive to structural degradation. To address this challenge, the INRAE UE Maraîchage and the UMR EMMAH initiated a mid-term experiment (2025–2027) comparing the effects of animal traction (TA) and motorized traction (TM) on soil health in organic market gardening. The experimental design relies on two adjacent 400 m² plots managed under TA and TM, monitored through a set of twelve complementary indicators, including biological (POxC, MicroResp, Bait Lamina), physical (VESS, Slake test, penetrometry), hydrophysical (Beerkan infiltration, soil moisture), and agronomic/organizational parameters.

This report presents the first results from two sampling campaigns (T0: unturned soil, T1: bare soil). At T0, soils displayed low to moderate labile carbon content, intermediate structural scores (VESS $\approx$ 2.5–3), high aggregate stability in surface horizons, and relatively low infiltration rates. By T1, infiltration capacity had significantly increased, and surface aggregate stability remained high, suggesting improved hydrodynamic functioning. Divergences between traction modes began to emerge, particularly in POxC (decrease under TA vs. stabilization under TM) and in the surface Slake test. Penetrometric monitoring highlighted the need for normalization by soil moisture to allow temporal and intermodal comparisons, with preliminary profiles indicating higher resistance in deeper horizons.

These results highlight the complementarity of multi-indicator approaches for assessing soil health and suggest that traction mode may differentially influence soil carbon dynamics and structural resilience. Long-term monitoring and integration into a Soil Health Index (SHI) will be required to confirm these trends and to evaluate the agronomic and ecological relevance of animal traction as a lever for sustainable soil management in Mediterranean organic market gardening.

Résumé

La compaction des sols constitue une contrainte majeure en systèmes maraîchers, particulièrement en contexte méditerranéen où les sols sablo-limoneux sont très sensibles à la dégradation structurale. Pour y répondre, l'INRAE UE Maraîchage et l'UMR EMMAH ont initié une expérimentation de moyen terme (2025–2027) comparant les effets de la traction animale (TA) et de la traction motorisée (TM) sur la santé des sols en maraîchage biologique. Le dispositif repose sur deux parcelles adjacentes de 400 m² conduites en TA et TM, suivies au moyen de douze indicateurs complémentaires : biologiques (POxC, MicroResp, Bait Lamina), physiques (VESS, Slake test, pénétrométrie), hydro-physiques (infiltration Beerkan, humidité du sol) et paramètres agronomiques/organisationnels.

Ce rapport présente les premiers résultats de deux campagnes d'échantillonnage (T0 : sol non travaillé ; T1 : sol nu). À T0, les sols montrent des teneurs en carbone labile faibles à modérées, des scores structuraux intermédiaires (VESS $\approx$ 2,5–3), une forte stabilité des agrégats en surface et des vitesses d'infiltration relativement faibles. À T1, la capacité d'infiltration a significativement augmenté et la stabilité des agrégats de surface est restée élevée, suggérant une amélioration du fonctionnement hydrodynamique. Des divergences entre modes de traction commencent à apparaître, notamment sur le POxC (diminution sous TA vs stabilisation sous TM) et sur le Slake Test de surface. Le suivi pénétrométrique a mis en évidence la nécessité d'une normalisation par l'humidité du sol pour permettre des comparaisons temporelles et inter-modalités. Les profils préliminaires indiquent une résistance accrue dans les horizons plus profonds.

Ces résultats soulignent la complémentarité des approches multi-indicateurs pour l'évaluation de la santé des sols et suggèrent que le mode de traction pourrait influencer différemment les dynamiques du carbone et la résilience structurale. Un suivi de long terme et l'intégration dans un Indice de Santé des Sols (SHI - Soil Health Index) seront nécessaires pour confirmer ces tendances et évaluer la pertinence agronomique et écologique de la traction animale comme levier de gestion durable des sols en maraîchage biologique méditerranéen.

1) Introduction

a) Contexte global

Dans un contexte de dérèglement climatique, de raréfaction de la ressource en énergie fossile et de questionnement sociétale sur la transition écologique; le travail du sol en agriculture fait l'objet d'un questionnement perpétuel. Le recours massif aux engins motorisés, bien que souvent associés à un gain de temps et d'efficacité dans de nombreuses exploitations agricoles, est aujourd'hui remis en cause en raison de son impact sur la santé des sols. Parmi ces impacts, la compaction des sols est une menace majeure. Causant des problèmes d'infiltration de l'eau, pouvant conduire à un risque accru d'érosion ou un manque d'eau pour les plantes, ou encore une barrière physique pour l'enracinement des cultures et un dérèglement de la vie des organismes du sol.

Face à ce constat, l'agriculture est amenée à repenser ses pratiques, notamment dans un contexte marqué par des enjeux environnementaux, sociétaux et économiques. Notamment, le maraîchage connaît une dynamique de renouvellement particulièrement portée par l'installation de personnes non issues du milieu agricole (NIMA), souvent motivées par la recherche d'un métier en adéquation avec leurs valeurs, que ce soit dans le cadre d'un premier choix de carrière ou d'une reconversion professionnelle. L'essor de techniques alternatives visant à réduire l'impact écologique tout en préservant les performances agronomiques amène à se questionner sur les outils mobilisés pour les travaux du sol. On peut notamment penser à l'émergence de nouvelles techniques alternatives -comme la technique des planches permanentes qui consiste à restreindre la compaction du sol sur une zone limitée, identique à chaque cycle cultural ; étudiées par le GRAB- ou encore le retour à d'anciennes techniques repensées avec les technologies et connaissances actuelles -comme le maraîchage sur sol vivant (MSV) qui induit un regain de vitalité du sol, impliquant une réduction voir un arrêt du travail du sol associé à un apport organique important, la mise en place d'un couvert permanent vert et une rotation et diversification des cultures, étudié par l'ADAF et l'UE Maraîchage situé à Alénia-. ou encore la traction animal qui permet un travail plus "modéré" et "respectueux" du sol.

b) Contexte du stage

C'est avec cette vision qu'a été initié le projet de recherche porté par l'UMR EMMAH (Avignon) et l'Unité Expérimental (UE) de Maraîchage d'Alénia (INRAE), en lien avec le projet PETTA (Place des Équidés de Travail dans la Transition Agroécologique). Le projet est basé sur l'analyse des « Effets de la traction animale sur la santé des sols en maraîchage – suivi d'indicateurs biologiques, physiques et hydro-physiques ». Il vise à comparer les effets de la traction animale (TA) et de la traction motorisée (TM) sur la santé des sols en système maraîchage biologique. Le suivi porte plus précisément sur des indicateurs biologiques (activité microbienne et de la méso-faune, respiration basale, Carbone biodisponible du sol), physique (résistance à la pénétration, stabilité des agrégats et structure du sol), et hydro-physique (humidité à plusieurs profondeur, et d'infiltration de l'eau dans le sol). De plus, l'expérience vise également à évaluer l'impact de ces deux modalités sur des indicateurs organisationnels (durée de travail, contraintes de calendrier ou de météo, etc) et agronomique (gestion des adventices, rendement, différenciation du travail à cause des différents outils, etc). Ce projet s'appuie sur 3 expérimentations conduites en parallèle sur la période 2025-2027. Une dans la station expérimentale de l'UE maraîchage, et deux autres dans des exploitations maraîchères (Drôme et Ardèche)

Dans ce cadre, j'ai intégré l'équipe expérimentale d'Alénia pour mon stage de deuxième année – stage prolongé sur le premier semestre de ma césure – pour une durée totale de six mois. Mon rôle est d'assurer le suivi opérationnel quotidien de l'expérimentation, en lien

étroit avec les techniciens, ingénieurs et partenaires intervenant sur le projet. J'ai notamment la charge de faire des prélèvements réguliers, du suivi des opérations culturales, et de documentation photographique et analytique des interventions. De plus, j'aurais l'occasion de participer à des campagnes de prélèvement sur les autres exploitations et de me rendre au centre d'EMMAH pour réaliser les expériences en laboratoire.

Ce rapport vise à documenter le travail que j'ai réalisé dans le cadre de cette mission. Il s'agira dans un premier temps de présenter le contexte technique et scientifique du projet, puis de décrire la méthodologie mise en œuvre pour suivre l'évolution de la santé du sol en lien avec les modalités TA et TM. Enfin, j'exposerai les premiers résultats obtenus, suivie d'une analyse critique et d'une discussion de ces résultats, accompagnée d'une réflexion sur les perspectives que ce type de comparaison ouvre en matière de gestion durable des sols en maraîchage biologique.

Ce rapport s'attachera à répondre à la question suivante : La traction animale peut-elle constituer un levier agronomique pertinent pour préserver la santé des sols dans les systèmes maraîchers biologiques en région méditerranéenne ?

2) Etat de l'art

La compaction des sols résulte principalement du trafic d'engins et dépend de plusieurs facteurs : la charge par essieu, le nombre de passages, la texture du sol, son état structural et son état hydrique au moment de l'intervention. Les véhicules agricoles modernes ont vu leurs charges par essieu croître de façon telle que les seuils mécaniques dits « sûrs » pour les sous-sols sont souvent dépassés ([Håkansson & Reeder, 1994](#) ; [Keller et al., 2022](#)). Ces pressions excèdent la limite élastique des horizons inférieurs, favorisant une compaction persistante, caractérisée par une réduction de la porosité d'air, de la conductivité hydraulique et de la capacité d'infiltration.

Sur le plan agronomique, cette compaction se traduit par une augmentation de la densité apparente et de la résistance mécanique à la pénétration, une diminution de la macroporosité, une restriction de l'enracinement et, in fine, une baisse du rendement ([Hamza & Anderson, 2005](#) ; [Shaheb et al., 2021](#)). De nombreuses études indiquent qu'une résistance à la pénétration dépassant environ 1 à 2 MPa — plage dépendante de l'espèce cultivée et de l'humidité du sol — devient limitante pour la croissance racinaire ([Bengough et al., 2011](#)).

Dans les systèmes maraîchers, cette problématique est particulièrement marquée. Les sols y sont fréquemment travaillés, souvent en conditions humides du fait de l'irrigation, et présentent majoritairement des textures légères à moyennes (limono-sableuses ou sablo-limoneuses) sensibles à la dégradation structurale ([Moebius-Clune et al., 2016](#)). La répétition des passages et la faible cohésion de ces sols accentuent les risques de tassement, notamment dans les horizons de surface (0–20 cm). Ces contraintes altèrent durablement la structure et limitent la capacité du sol à stocker et restituer l'eau pour les cultures. Pour ces raisons, la gestion du trafic — notamment par le confinement des passages à des voies fixes (approche Controlled Traffic Farming ou planches permanentes) — constitue un levier reconnu pour réduire la compaction et améliorer la stabilité structurale des sols cultivés ([Chamen, 2015](#) ; [Védie et al., 2009](#)).

Les véhicules agricoles modernes atteignent aujourd'hui des masses et des pressions critiques pour le fonctionnement du sol. [Keller et al., \(2022\)](#) ont montré que les engins de plusieurs dizaines de tonnes appliquent des contraintes dépassant les seuils de résistance mécanique des sols (~100–150 kPa), atteignant parfois des valeurs comparables à celles exercées par les dinosaures sauropodes. Ces pressions induisent des déformations plastiques durables, limitant la circulation de l'air et de l'eau dans le profil ([Cambi et al., 2015](#)). Même en maraîchage, les tracteurs légers exercent des pressions de contact de 120 à 160 kPa sous pneus à basse pression ([Chehaibi et al., 2012](#) ; [František B. et al., 2022](#) ; [H. Schwanghart, 1991](#)). Ces valeurs excèdent les seuils critiques pour les sols limoneux humides, générant une compaction rapide et difficilement réversible.

À l'inverse, la traction animale (TA) se distingue par une contrainte au sol bien plus faible. Les équidés de trait exercent une pression moyenne au sol comprise entre 50 et 80 kPa, selon le poids, la surface du sabot et l'allure, avec des pics localisés pouvant atteindre quelques centaines de kPa mais sur des durées très brèves ([Faramarzi et al., 2018](#) ; [Logan et al., 2021](#)). Ces pressions moyennes sont généralement deux à trois fois inférieures à celles d'un pneu agricole classique, et surtout exercées de manière ponctuelle sur le sol. En outre, la charge exercée par un animal étant répartie sur quatre appuis ponctuels successifs et non en

continue comme pour le déplacement d'une roue, les contraintes se dissipent rapidement en profondeur. Ce mode de traction « low-load / low-speed » génère donc des effets mécaniques principalement superficiels, favorisant la préservation de la structure et la porosité fonctionnelle.

Des études comparatives montrent que la traction motorisée induit des densités apparentes et des résistances pénétrométriques plus élevées que la traction animale, associées à une diminution de la conductivité hydraulique ([García-Tomillo et al., 2017](#)). Ces différences sont particulièrement nettes sur sols sablo-limoneux méditerranéens, où la résistance pénétrométrique peut rapidement dépasser les valeurs limitantes (>2 MPa) après plusieurs passages motorisés, alors qu'elle demeure plus faible dans les modalités à charge réduite.

Dans ce contexte, l'adoption des planches permanentes en maraîchage biologique, telle qu'évaluée par [Védie et al. \(2009\)](#) dans une étude multi-site conduite par l'INRAE, s'avère particulièrement pertinente. Ce dispositif consiste à dédier des bandes permanentes à la culture et à confiner le passage des engins ou animaux à des allées fixes, ce qui permet de réduire considérablement la surface soumise à la compaction. Les auteurs montrent que cette organisation spatiale améliore la porosité structurale, la portance, et la stabilité du sol, tout en facilitant le travail en conditions humides. Cette approche favorise la durabilité physique des sols maraîchers, en limitant la dégradation structurale et en optimisant la gestion de l'humidité.

Ces techniques sont connues pour permettre de limiter la dégradation des sols, mais il est important de savoir quantifier l'état initial d'un sol pour orienter et adapter les actions à mener ainsi qu'établir des méthodes de suivi de cet état. Pour quantifier l'évolution de la santé des sols en réponse aux contraintes imposées par différentes activités agricoles, des indicateurs de suivis ont été élaborés pour permettre une comparaison rigoureuse entre plusieurs sols. Comme le montre des récents travaux ([Cousin I. et al., 2025](#)), trouver des indicateurs universels est complexe à cause de l'importante diversité et spécificité de chaque sol. Il existe toutefois des méthodes comme le protocole Biofunctool ([Thoumazeau A. et al., 2019](#)), proposant des sets d'indicateurs de terrains associés à une méthode statistique permettant d'approcher avec fiabilité la santé des sols. Il repose notamment sur l'évaluation de trois principales fonctions du sol : la dynamique du carbone, le cycle des nutriments et le maintien de la structure du sol, avec un total de huit indicateurs. Ce protocole est encore aujourd'hui actualisé et discuté. En effet, l'objectif est de rendre compte de l'état du sol en suivant trois fonctions avec un nombre d'indicateurs minimal efficaces pour éviter les redondances. C'est pourquoi chaque paramètre du sol n'est pas étudié, comme par exemple un suivi fin de la compaction.

La quantification de la compaction repose classiquement sur la pénétrométrie, qui mesure la résistance mécanique du sol à la pénétration d'une tige conique selon la profondeur. Cet indicateur, simple et reproductible, est corrélé à la densité apparente et à la cohésion du sol ([Busscher, W. J., 1990](#)). Cependant, la résistance à la pénétration est fortement influencée par l'humidité : plus le sol est humide, plus la résistance mesurée diminue, indépendamment de la structure réelle ([Wininton M., 2016](#)). Pour permettre des comparaisons valides entre sites de prélèvement et dans le temps, il est donc nécessaire de normaliser les mesures. Il existe par exemple un modèle de correction par l'humidité selon une loi de puissance empirique comme

mentionné par [Carlos M.P. Vaz \(2011\)](#): $Q = a \times \theta^b$ qui nous permet de calculer une résistance normalisée : $Q_{normalisée} = Q_{mesurée} \times \left(\frac{\theta_{ref}}{\theta_{mesurée}}\right)^b$. Où $Q_{normalisée}$ est la résistance normalisée (kPa), $Q_{mesurée}$ la résistance mesurée (kPa), θ_{ref} l'humidité de référence (%), $\theta_{mesurée}$ l'humidité mesurée (%) et b un coefficient dépendant de la texture.

Cette approche permet de distinguer les effets mécaniques réels du trafic des effets liés à la variabilité hydrique.

En somme, la combinaison d'une gestion raisonnée du trafic (planches permanentes, limitation de la charge par essieu) et de l'usage de la traction animale apparaît comme une voie agroécologique robuste pour préserver la structure, la porosité et l'activité biologique des sols maraîchers méditerranéens, tout en maintenant leur fonctionnalité hydrique et biologique ([Chamen, 2015](#) ; [Védie et al., 2009](#) ; [Keller et al., 2022](#)).

3) Matériel et Méthodes

a) Dispositif expérimental

Le dispositif d'essai est situé dans l'UE Maraîchage INRAE d'Alénia (66200), dans la plaine littorale méditerranéenne, au climat méditerranéen. L'expérimentation a commencé début 2025 et la fin est prévue pour la fin d'année 2027. L'essai se déroule sur une ancienne friche non cultivée depuis 2020, caractérisée par un sol limono-sableux. De plus, la zone où la parcelle a été installée présente des irrégularités en termes de texture du sol (présence de bandes sableuses). Un travail de réflexion a donc été mené pour décider de l'emplacement de la parcelle afin d'éviter un maximum la présence d'un gradient pédologique au sein de la parcelle, puis un bilan pédologique a été mené ([annexe 1](#)). L'espace a ensuite été divisé en deux modalités, chacune représentée par une parcelle de 400 m² : ([annexes 2 et 3](#))

- Modalité Traction Animale (TA) : interventions d'outils tractés par deux chevaux de trait (Douce une Mérens x Franche-montagne de 600kg et Tam un Mérens x Comtois de 750g). Ces interventions sont réalisées par un prestataire proposant ces services en TA, notamment auprès de viticulteurs. En plus du matériel qu'il possède, l'emprunt d'une kassine a été fait à l'IFCE. Les opérations culturales importantes sont conseillées par Claude Sandillon, possédant une meilleure connaissance des cultures maraîchères en TA et ayant coproduit un "Manuel de la Traction Animale Moderne - Maraîchage" ([Keller et al., 2010](#)).
- Modalité Traction Motorisée (TM) : interventions d'outils tractés par un tracteur, réalisés par le personnel du site. Ces interventions sont réalisées de préférence après celles réalisées en TA, de manière à imiter les profondeurs de travail qui sont limitées par la puissance des animaux en TA et ainsi rapprocher le plus possible les deux modalités de travail réalisé. Les outils utilisés sont choisis pour ressembler le plus possible à l'action des outils utilisés en TA sur le sol (en termes de profondeur, d'effet sur le sol, de décompaction ...).

Un itinéraire technique (ITK) prévisionnel ([annexe 4](#)) a été formulé lors d'ateliers de co-conception du projet, entre décembre 2024 et février 2025, afin de prévoir les différentes interventions. Il prévoit une succession d'interventions entre Février 2025 et Février 2026. A noter que cet ITK sert de guide pour la conduite de la parcelle, mais n'a pas pour but d'être contraignant si une modification de calendrier est nécessaire (un récapitulatif de l'ITK réalisé est en cours d'élaboration ([annexe 15](#))). La conduite effective de la culture est décidée au sein de l'UE maraîchage et est régulièrement discutée lors de réunions. En particulier l'irrigation qui se fait par aspersion en simultanée sur les deux parcelles ou encore le déclenchement des interventions de travail du sol, dépendantes de l'évolution du sol, du développement des adventices ou encore du stade de croissance de la culture.

b) Stratégie d'échantillonnage

Pour suivre l'évolution de la parcelle et de la vie du sol, deux types de prélèvements ont été mis en place. Les mesures de routine (taux d'humidité, pénétrométrie, taux d'enherbement, suivi documentaire des interventions) sont analysées sur le site d'Alénia. Ces suivis sont assurés par le personnel présent sur le site et sont en particulier la mission principale de mon stage. Parallèlement, des campagnes de prélèvement plus complètes sont menées en partenariat avec les équipes de l'UMR EMMAH.

Ces prélèvements sont réalisés en six pseudo-répétitions pour chaque modalité, repérés par des balises ([annexe 5](#)). Leur disposition a été décidée de manière à réduire les effets de bords, d'éviter de potentiel variation microclimatique et à prévenir l'apparition d'un gradient pédologique induit par les opérations de travail du sol. Pour mener à bien les opérations culturales, ces balises sont retirées à chaque passage d'outils, puis replacées grâce à des marques fixes placées par GPS aux quatre coins des parcelles. Lors de la phase de travail du sol, un seul échantillon était prélevé à chaque point de prélèvement. En revanche, durant la phase de culture en buttes, le sol n'est plus travaillé de manière homogène entre les buttes et les interbuttes. Pour capter cette différenciation du sol, la stratégie d'échantillonnage est légèrement complexifiée. Pour chaque point de prélèvement, deux mesures appariées sont réalisées : l'une sur la butte, l'autre sur le passage ([annexe 6](#)). De plus, dans le souci d'avoir des mesures qui reflètent au mieux l'état réel du sol, une modification du plan d'échantillonnage a été réalisée environ huit mois après le début de l'expérimentation et sera reconduite : tous les points ont été décalés d'un rang sur la gauche. Cela permet notamment de pallier les perturbations du sol induites par des prélèvements destructifs.

c) Indicateurs de suivis et protocoles de mesure

L'expérimentation repose sur un ensemble de douze indicateurs, répartis en deux grandes familles complémentaires ([annexe 7](#)).

D'une part, huit indicateurs ont été sélectionnés pour leur capacité à mesurer de manière directe et objectivable la santé du sol. Parmi eux, six sont issus du protocole BioFuncTool "BFT", fondé sur des tests de terrain simples à mettre en œuvre et scientifiquement validé, et deux autres ont été choisis pour enrichir l'analyse des propriétés physiques et hydro-physiques du sol. Ces indicateurs permettent de renseigner précisément plusieurs fonctions clés du sol : la dynamique du carbone, la structure du sol et le fonctionnement hydrique, ainsi que le cycle des nutriments.

D'autre part, quatre indicateurs supplémentaires complètent l'approche en apportant une lecture plus agronomique et organisationnelle du système. Moins centrés sur les propriétés intrinsèques du sol, ils s'appuient sur l'observation du fonctionnement global de la parcelle et l'analyse qualitative des retours d'expérience des opérateurs pour approcher l'état de santé du sol.

Indicateurs de la dynamique du carbone

La dynamique du carbone est appréhendée par trois approches complémentaires, renseignant sur la quantité de carbone organique biodisponible, la respiration basale du sol ainsi que la vitesse de dégradation de matière organique par la mésofaune et petite macrofaune.

L'analyse du carbone oxydable POxC (Permanganate Oxidizable Carbon - **BFT**) permet de mesurer la quantité de carbone organique labile du sol. Il repose sur un dosage par spectrophotométrie réalisé à partir d'un mélange de terre tamisée à 2mm, préalablement séchée à l'air libre, et d'une solution de permanganate de potassium (KMnO_4) : un oxydant de la MO (Matière Organique). La mesure d'absorbance traduit la quantité de carbone oxydé et permet d'estimer la part biodisponible du carbone présent dans l'échantillon.

Le protocole MicroResp permet d'évaluer la respiration basale du sol en réponse à différents substrats carbonés. Cette méthode vise à caractériser la diversité fonctionnelle de la microflore du sol en mesurant son activité métabolique. Pour ce faire, des échantillons de sol sont incubés avec huit solutions différentes, chacune contenant un substrat carboné particulier (glucose, tréhalose, alanine, ...). Placée en vis-à-vis, une plaque réactive renfermant un gel sensible au CO_2 permet de détecter les émissions microbiennes par un changement de couleur. L'intensité de cette réaction est ensuite quantifiée par spectrophotométrie, ce qui permet de mesurer la concentration de CO_2 produite et d'identifier les profils métaboliques spécifiques des communautés microbiennes selon les substrats testés, ainsi que la masse microbienne et le $q\text{CO}_2$ (quotient métabolique, témoin de l'efficacité métabolique lié à la création de biomasse par rapport à la respiration).

Le test Bait Lamina (BFT) permet d'estimer l'activité biologique visible du sol en mesurant la capacité de la pédofaune (principalement la mésofaune et la petite macrofaune) à dégrader un substrat organique. Pour cela, huit plaques rigides comportant seize cavités pré-remplies de substrats carbonés (eau - agar agar - cellulose) sont insérées verticalement dans le sol à chaque point de prélèvement. Les plaques restent en terre deux à quatre semaines jusqu'à ce qu'un témoin atteigne un seuil de dégradation supérieur à 80%. Pour chaque cavité, un score de dégradation est attribué entre 0 pour ceux non dégradés jusqu'à 1 pour ceux totalement dégradés. Le score global du point de prélèvement est le cumul des valeurs issues des sept plaques. Cette approche permet de traduire l'activité biologique du sol en un indicateur quantifiable et d'intégrer la notion de profondeur.

Cette mesure vient en remplacement de la mesure de vers de terre initialement prévue, abandonnée car un seul vers de terre a été observé lors du premier dénombrement.

Indicateurs de la structure du sol à différentes profondeurs

L'analyse de la structure du sol repose sur un ensemble de quatre tests complémentaires, chacun renseignant une propriété spécifique du sol et réalisé à des profondeurs spécifiques : la capacité d'infiltration (en surface), la stabilité des agrégats (0-10 cm), la structure du sol (0-25 cm) et la résistance à la pénétration (0-45 cm).

Le test d'infiltration BeerKan (BFT +), réalisé In Situ, permet d'estimer le potentiel d'infiltration du sol. Il consiste à l'apport successif d'un volume d'eau dans un cylindre fixé au sol, jusqu'à atteindre un régime stationnaire, c'est à dire que le temps d'infiltration d'un volume d'eau devienne quasi constant pendant plusieurs répétitions. Ce test donne accès indirectement à la sorptivité, indiquant l'état de porosité et la présence de microcanaux facilitant l'entrée de l'eau. Contrairement au protocole simplifié du BioFuncTool qui propose un arrêt arbitraire de la mesure après un certain nombre de doses et sans prendre de mesure de teneur en eau à saturation, le protocole réalisé sur notre terrain est conformément aux habitudes de mesure des membres hydro-physiciens de l'équipe d'EMMAH mené jusqu'à l'atteinte d'une stabilité dans l'écoulement afin de se placer dans des conditions permettant d'estimer K_s (conductivité hydraulique à saturation). Des mesures de VWC (Volumetric Water Content) sont prises à sec avant et en conditions de saturation après le test d'infiltration avec une sonde TDR FieldScout 350.

Le Slake Test (BFT) permet d'évaluer la stabilité des agrégats du sol en conditions de saturation hydrique. Le test est scindé en deux modalités : les agrégats superficiels (AggSurf : 0 à 2 cm) et les agrégats plus profonds (AggProf : 2 à 10 cm). Le test se réalise sur des agrégats préalablement séchés à l'air libre et se décompose en une première étape d'immersion dans un bain d'eau durant cinq minutes, puis d'une mise en mouvement avec cinq aller retour dans l'eau. L'intensité de la destruction à chaque étape est notée selon une grille préétablie, traduisant la capacité du sol à maintenir sa cohésion en agrégats face aux perturbations hydriques. (*annexe 8*)

Le test VESS (BFT) est une méthode d'évaluation visuelle de la structure du sol, basée sur l'observation directe d'un bloc de sol extrait sur le terrain. Il permet de juger de la qualité physique du sol, en examinant plusieurs critères : la porosité, l'organisation et l'état physique des mottes et des agrégats, la présence de racines visibles, l'activité biologique (présence de faune, galeries ...) et les marques d'oxydations. Chaque critère est noté à partir d'une grille d'évaluation standardisée (*annexe 9*). Étant donnée la variabilité de chaque horizon, ces scores sont repris pour chaque horizon et pondérés par l'épaisseur de ce dernier, pour obtenir une note intégrée à l'échelle du bloc.

La mesure de pénétrométrie normalisée sur l'humidité comprend deux mesures.

La première est une mesure du taux d'humidité du sol, utile pour normaliser d'autres mesures (comme la mesure de pénétrométrie). Trois prélèvements sont effectués à la tarière (0-10 cm, 10-20 cm et 20-40 cm), chacun est pesé avant et après séchage à 105°C dans une étuve BINDER FED 720 pour calculer le taux d'humidité.

La seconde est le test de résistance à la pénétration du sol avec un pénétromètre FieldScout SC900 Soil Compaction Meter. L'objectif est d'évaluer la compaction du sol en mesurant la résistance physique (en kPa) à la pénétration d'une tige. Toutefois, cette mesure est très dépendante au taux d'humidité du sol. La mesure brute est donc compliquée à utiliser tel quel et nécessite une normalisation par l'humidité.

Indicateur du cycle des nutriments

Afin de caractériser le fonctionnement du cycle des nutriments, un indicateur ciblé a été retenu. Il vise à évaluer la disponibilité en nitrates, principale forme assimilable d'azote pour les plantes, et donc essentielle à la productivité des systèmes maraîchers.

Le NitraTest (BFT) repose sur une méthode colorimétrique simple visant à estimer la concentration de ces ions dans le sol. Un échantillon de sol frais est préalablement dissous dans de l'eau distillée, afin d'en extraire les nitrates solubles. La solution obtenue est ensuite analysée à l'aide d'une bandelette colorimétrique, dont la lecture se fait via un spectrophotomètre de poche (NitraChek 404), permet de quantifier précisément la teneur en nitrates.

Indicateurs agronomiques

Dans cette sous-partie sont regroupés les indicateurs permettant d'évaluer qualitativement le fonctionnement agronomique des modalités de traction. L'objectif est de caractériser par des mesures ciblées, l'impact des pratiques motorisés ou animales sur les paramètres de productivité, de gestion de conduite de la parcelle, de gestion des adventices et de présence de vie diverses sur les parcelles.

Le taux de recouvrement des adventices a pour objectif de quantifier la surface couverte par des adventices sur les parcelles. Pour cela, un relevé botanique est effectué à chaque point de prélèvement, en attribuant une note à chaque famille phylogénétique selon la classification de Dominance-Abondance de Braun-Blanquet (*annexe 10*). Cela nous permet de déterminer la dynamique colonisatrice des différentes adventices selon les modalités TA et TM.

L'hypothèse ici est que la nature du travail du sol (intensité, profondeur, compactage) pourrait influencer la germination et l'implantation des adventices. Les relevés successifs permettent donc un suivi diachronique de la pression en adventices, rendant possible l'évaluation de l'influence du mode de traction sur la régulation des adventices ou encore leur diversité.

Le relevé de pédofaune superficielle consiste à compter et peser les verres de terre présents en surface du sol. Ce protocole vise à détecter les espèces bioindicatrices de la santé du sol. Il offre une vision directe sur la vitalité du sol. La présence ou l'absence de certains taxons (anéciques, endogés, épigés) fournit un indicateur complémentaire aux autres indicateurs biologiques plus quantitatifs déployés par ailleurs. Cependant, la conservation de ce test est en cours de discussion à cause de l'absence d'observation de verre de terre sur la parcelle, avec une suspicion d'une incompatibilité entre la présence de verre de terre et la texture trop sableuse du sol. Il a été remplacé par le test Bait Lamina. En parallèle, un prélèvement d'enchytréides sera testé (des individus ont déjà été observés dans les surnageants lors des tests BeerKan), mais cette technique est beaucoup plus coûteuse que les relevés de verre de terre ou de Bait Lamina (environ 100€ par point de prélèvement).

Le relevé de rendements et de qualité viennent documenter la performance productive de chaque modalité. A chaque point de prélèvement, les poids récoltés sont enregistrés, ainsi que le nombre de calçots commercialisables et les critères de qualité agronomique (calibre, défauts). Les détails exact du protocole sont encore à finaliser.

Indicateur organisationnel : approche participative

Un indicateur qualitatif a été retenu de manière à recueillir les motivations, les choix et les ressentis des opérateurs directement impliqués dans le travail du sol. Lors de chaque intervention, ces différents points sont consignés sous forme de commentaires pour servir d'archive et être consultés si nécessaire plus tard. De plus, tous les détails des opérations culturales sont notés (*annexe 11*). Ils pourront être utiles pour expliquer et comprendre de potentielles variations dans les mesures ou encore argumenter sur les choix de modifications de l'ITK prévisionnel.

Même si ces indicateurs agronomiques et organisationnels n'entrent pas forcément directement dans l'évaluation de la vie du sol, ils permettent toutefois de discuter de la viabilité technique et économique des pratiques mises en place. Ils constituent ainsi des données pour explorer des pistes d'amélioration, voire valider la compatibilité entre viabilité agronomique et des méthodes à moindre impact comme la traction attelée.

d) Collecte, saisie et organisation des données

Pour garantir la cohérence au cours de la collecte de ces nombreuses mesures sur une longue période, chaque mesure est effectuée en suivant une fiche terrain normalisée spécifique à la mesure, puis retranscrite dans un fichier excel structurés et standardisés. (*annexe 12*). Ces fiches renseignent la date, la modalité de traction (TA ou TM) ainsi que la position du prélèvement (Non Différencié : ND / Ridge : R / Passage : P), le numéro du point de prélèvement et la ou les valeurs mesurées ainsi que de potentiels calculs ou commentaires. Ces fichiers permettent le stockage des données ainsi que la recherche d'anomalies rapides, tout en assurant une homogénéité des mesures dans le temps.

Ensuite, toutes les données sont regroupées dans deux bases de données globales, une regroupant les mesures de toutes les campagnes et l'autre pour les mesures de suivis hors campagnes. L'objectif est d'avoir une seule grosse base de données condensée, permettant d'accompagner le travail de recherche dans une volonté d'Open Science.

e) Mise en place d'un SHI et intégration des résultats

A partir de toutes les données brutes collectées, nous élaborons un indicateur global permettant d'avoir une note synthétique et une comparaison simple entre les deux modalités. L'indicateur global de la santé des sols (Soil Health Index : SHI) permet de synthétiser des indicateurs multidimensionnels en un score unique. Cet outil favorise la comparaison entre les modalités malgré la prise en compte de nombreux indicateurs variés.

L'ensemble de ces indicateurs, déployés de manière combinée, nourrit l'agrégation statistique de notre index global. Cette approche intégrative permet à la fois de suivre finement les réponses immédiates du sol aux opérations culturales mais également d'appréhender l'évolution de sa santé biologique et physique au cours du temps, et d'observer une potentielle différenciation liée aux modalités de traction.

Sélection des variables

Pour dresser cet index, il faut dans un premier temps choisir les variables représentatives des fonctions essentielles du sol. On intègre des indicateurs physiques, chimiques et biologiques. Le choix repose sur les fonctions du sol que l'on veut prendre en compte, leur pertinence agronomique ou écologique et la faisabilité des mesures en conditions de terrain. Cette sélection garantit que l'indicateur global reflète fidèlement l'état réel du sol. Dans notre cas, le choix a été orienté par la problématique principale qui porte sur la compaction du sol avec un large panel de fonctions étudiées en tenant compte de la faisabilité de mise en place des relevés associés. Les indicateurs issus du protocole BioFuncTool bénéficient déjà d'une reconnaissance importante au sein de la communauté scientifique en agroécologie. Les indicateurs complémentaires sélectionnés dans notre protocole enrichissent quant à eux l'analyse en apportant des informations spécifiques sur les propriétés hydro-physiques du sol, ainsi que sur des aspects organisationnels et économiques liés à la mise en œuvre des pratiques de travail du sol.

Normalisation des données : S_i

Pour permettre la création du SHI, chaque variable mesurée est normalisée. Cette étape est nécessaire car toutes les variables présentent des unités ainsi que des échelles différentes et ne peuvent être comparées en l'état. On convertit les valeurs brutes sur une échelle comprise entre 0 et 1. Selon la relation entre la variable et la fonction du sol, on peut appliquer une fonction linéaire (lorsque la valeur optimale est représentée par le minimum (Less is Better) : $S_i = a_{\min}/a_i$ ou le maximum (More is Better) : $S_i = a_i/a_{\max}$) ou une fonction Gaussienne (lorsqu'il existe un seuil optimal à ne pas dépasser : $S_i = e^{-\frac{1}{2}(\frac{x-m}{s})^2}$: les S_i suivent une loi normale, avec m la valeur optimale et s l'écart-type. Pour une précision plus fine, nous pouvons également définir un écart-type gauche différent de l'écart-type droit si on souhaite une fonction asymétrique). Cette étape homogénéise les contributions de chaque indicateur au calcul final.

Pondération des indicateurs : W_i

Enfin, il reste un dernier paramètre à prendre en compte avant d'agréger nos indicateurs. Toutes les variables n'ont pas la même influence sur la santé globale du sol. Il faut donc, en plus de la normalisation, apporter un facteur correctif pour représenter l'importance relative de chaque variable. Cette pondération peut être déterminée grâce à des recherches bibliographiques ou par une analyse statistique multivariée. En ajustant ces coefficients finement, on peut orienter l'indicateur global pour faire ressortir les fonctions du sol les plus

déterminantes pour l'objectif visé. Dans notre cas, la pondération est réalisée avec les valeurs propres de la dimension principale de l'ACP.

Agrégation et calcul du SHI

L'indicateur global se calcule ensuite par agrégation pondérée des scores normalisés avec la

formule suivante : $SHI = \sum_{i=1}^n w_i * S_i$ (*annexe 13*)

f) Normalisation de la mesure de pénétrométrie

Comme indiqué auparavant, les données de pénétrométrie sont dépendantes de l'humidité. Ainsi, pour comparer les mesures réalisées à plusieurs dates présentant des taux d'humidité différents, il est obligatoire de normaliser les données par l'humidité pour permettre la comparaison. Le calcul de résistance normalisé suit cette loi de puissance ajustée :

$Q = a \times \theta^b$ (avec Q : résistance à la pénétration (kPa) ; θ l'humidité (%) ; a et b deux paramètres)

Cette loi est une loi empirique, nécessitant d'être ajustée avec un jeu de données afin de trouver le bon paramètre "b" qui est une constante dépendante de la texture du sol. Dans un premier temps, ce paramètre est déterminé en réalisant une régression linéaire avec une équation linéarisée en passant au logarithme : $\log(Q_{mesurée}) \sim \log(a) + b * \log(\theta_{mesurée})$. Une fois

le paramètre "b" trouvé, nous pouvons recalculer les valeurs de résistance normalisée " $Q_{normalisée}$ " avec un taux d'humidité de référence θ_{ref} choisi, qui sera commun pour tous.

$$Q_{normalisée} = Q_{mesurée} \times \left(\frac{\theta_{ref}}{\theta_{mesurée}} \right)^b \quad (\text{annexe 14})$$

L'objectif derrière l'utilisation de cet indicateur est d'apporter une mesure quantitative de la structure du sol, en complément des autres tests qui reposent principalement sur des mesures qualitatives. Cet indicateur présente l'intérêt d'explorer les caractéristiques physiques du sol en profondeur -jusqu'à 45 cm- là où les autres mesures se limitent généralement à 10 ou 25 cm. Il permet un diagnostic plus complet en détectant d'éventuels phénomènes de compaction en surface ou en profondeur, qui pourraient notamment impacter l'enracinement des cultures, l'infiltration de l'eau et la dynamique biologique.

Cependant, cet indicateur est encore sujet à réflexion, car l'extrapolation d'une note à partir des données d'un profil pénétrométrique est complexe. Nous reprendrons le questionnement à propos de cet indicateur dans la partie "Perspectives".

4) Résultats obtenus

Cette section présente les résultats obtenus sur les trois campagnes d'observation (T0, T1 et T2), ainsi que lors des mesures de suivi de travail du sol. Pour rappel, l'expérimentation se déroule en maraîchage méditerranéen, sur un sol limono-sableux ($\approx 60\%$ sables, 30% limons, 10% argiles - cf [annexe 1](#)). Après avoir rappelé l'organisation du calendrier d'échantillonnage, nous exposons les distributions brutes des indicateurs (POxC, VESS, Slake, Beerkan, MicroResp/microbial biomass) à l'aide de boxplots regroupés dans des graphiques multi-indicateurs. Les analyses statistiques confirmatoires sont conduites en parallèle ; nous discutons ici des tendances observables et de leur cohérence, avant d'examiner la variabilité intra-parcellaire puis de détailler la normalisation des données de pénétration, pour enfin établir le SHI.

a) Jeux de données et calendrier d'échantillonnage

Trois campagnes de mesure ont été réalisées : T0 (sol nu, au début du travail du sol), T1 (en cours de travail du sol) et T2 (avant récolte). Les mesures ont été effectuées sur les deux modalités de traction — animale (TA) et motorisée (TM). Des séries complémentaires autour des interventions de travail du sol ont permis de suivre finement la résistance à la pénétration et l'état hydrique du profil.

ND / R / P	Date de mesure	Chronologie par rapport aux interventions		Commentaire
ND	Campagne T0 17/02/2025	Tonte		
ND	04/04/2025 - T021	Labour	avant	Pas de penetro
ND	11/04/2025 - T022		après	
ND	06/05/2025 - T031	1er faux semis	avant	
ND	13/05/2025 - T032		après	
ND	Camapgne T1 03/06/2025	2eme faux semi	avant	Instauration NitraTest
ND	19/06/2025 - T112		après	
ND	03/07/225 - T121	3eme faux semi	avant	
ND	08/07/2025 - T122		après	
ND	06/08/2025 - T131	Plantation	avant	
R / P	14/08/2025 - T132		après	Première mesure R/P Rang < 5/10cm < Passage
R / P	12/09/2025 - T141	Binnage	avant	
R / P	17/09/2025 - T142		après	Rang hauteur Passage
R / P	Camapgne T2 07/10/2025	Buttage	avant	Instauration Bait Lamina
R / P	10 et 17/10/2025 - T212		après	TA : Rang > 25/30cm > Passage TM : Rang > 20/25cm > Passage
R / P	13/11/2025 - T221	2nd buttage	avant	
R / P	17/11/2025 - T222		après	TA : Rang > 25/30cm > Passage TM : Rang > 25/30cm > Passage

Figure 1 : Calendrier des mesures. La nomenclature des dates de mesures est défini comme suit : T + n° campagne (0,1,2,...) + n° mesure (1,2,3,...) + n° temporalité (1 : avant travail | 2 : après travail). Les dates hors campagnes représentent uniquement des mesures d'humidité et de pénétrométrie, sauf la mesure du 04/04/2025 où uniquement les relevés d'humidité ont été réalisés. Pour une vision d'ensemble plus simple, un récapitulatif de l'ITK réalisé est en cours d'élaboration ([annexe 15](#)).

Toutes ces données recueillies sont ensuite retranscrites dans des fichiers excel normalisés. Le but étant d'avoir une cohérence de notation et de format entre les différentes données pour permettre une meilleure efficacité lors du traitement des données. En effet, l'objectif est d'élaborer un script R automatisé qui permet, à chaque nouvelle campagne, de visualiser les données et de faire les analyses statistiques sans avoir à réadapter le script d'analyse à chaque fois.

b) Présentation des données brutes (campagnes T0 - T1 - T2)

Structure et propriétés hydrodynamiques (VESS, Slake, Beerkan, densité)

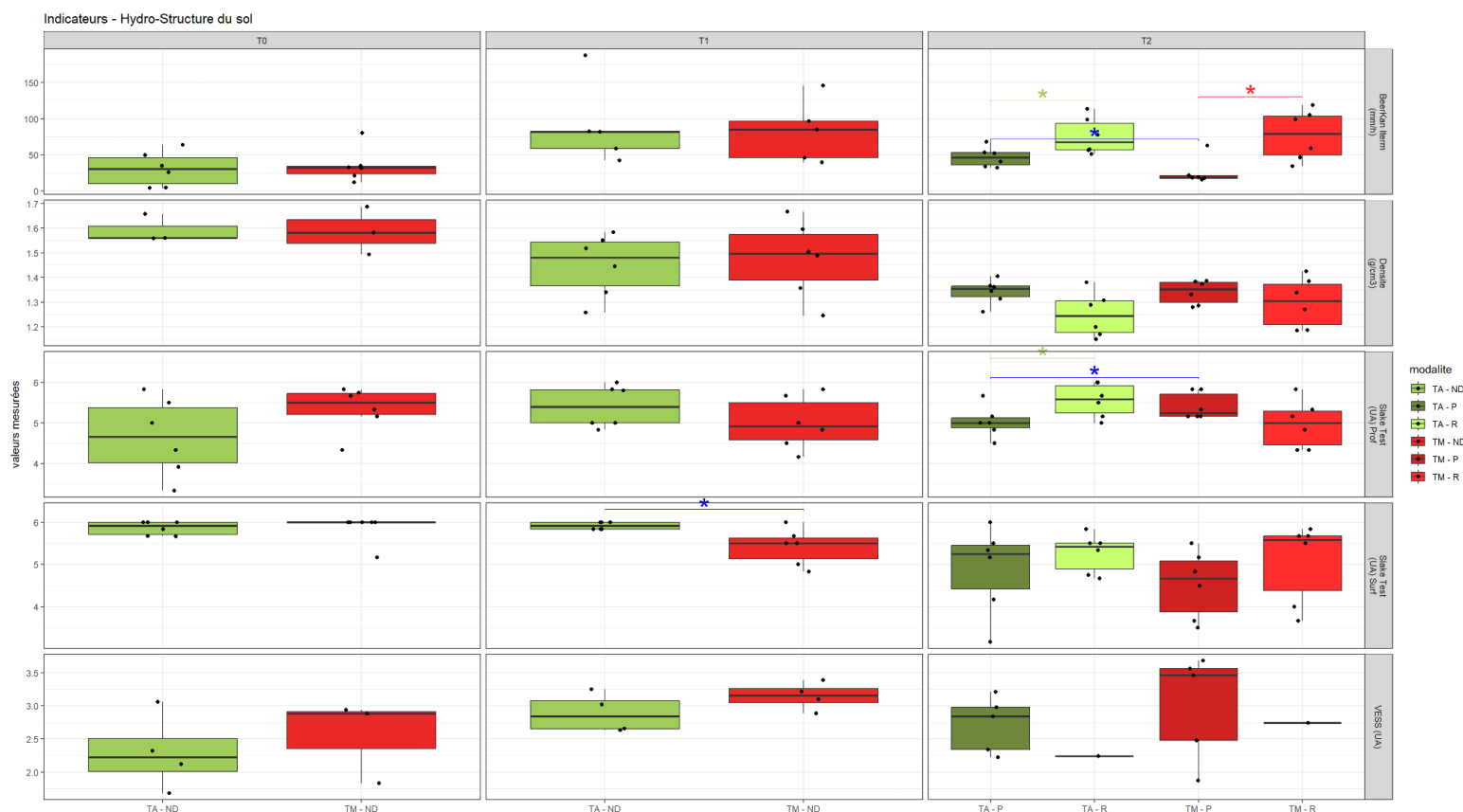


Figure 2 : Boxplots des mesures de Beerkan, densité, slake test et VESS pour les campagnes T0, T1 et T2 par modalité. Les boîtes représentent les premier, second (médiane) et le troisième quartiles.

Les scores VESS, notés de 1 (très bonne structure) à 5 (structure dégradée), se répartissent globalement entre 2 et 3 à T0, indiquant une structure en mottes pénétrables par les racines avec une bonne porosité. À T1, les valeurs se concentrent entre 2,5 et 3,5 selon les modalités, présentant une tendance à l'augmentation. Cela peut s'expliquer par une fermeture de la structure du sol soit sous l'effet hydrique (pluie et irrigation), soit sous l'effet mécanique des interventions agricoles. Cette tendance est conservée à la campagne T2, où les VESS ont été principalement réalisées sur les passages. On observe une plus grande variabilité, mais des notes toujours élevées, témoignant d'une structure fermée. Avec une vision agronomique, on cherchera à orienter les interventions pour agir et améliorer la structure du sol. Ce qui résulterait à une diminution des scores, avec l'objectif d'atteindre une note optimale entre 1 et 2,5, notamment sur les horizons de cultures.

La stabilité d'agrégats évaluée par le Slake Test est élevée en surface ($\approx 5,6-6$), et moyenne à bonne en sous-surface ($\approx 4-5,5$) à T0. À T1, la surface se maintient à un très bon niveau en TA ($\approx 5,8-6$), tandis qu'on observe une diminution en TM ($\approx 5,0-5,7$), faisant apparaître une différence significative ; en sous-surface, les notes se situent entre 4,5 et 5,8 sans différenciation nette. En T2, on observe une tendance à la diminution globale en surface, et des variations en profondeur montrant des meilleures notes sur la buttes en TA par rapport au passage. Ces résultats suggèrent une bonne résistance des agrégats à la désagrégation par humectation ou hydratation, favorable à la limitation de la battance.

Ces résultats coïncident avec les résultats de densité et de BeerKan. Il semble y avoir une corrélation entre une diminution de la densité et des meilleures notes de Slake Test et des infiltrabilités terminales plus hautes.

Les essais Beerkan mettent en évidence une amélioration nette de l'infiltration entre T0 et T1. La vitesse d'infiltration stationnaire se situe entre 10 et 60 $\text{mm}\cdot\text{h}^{-1}$ à T0 (faible à modérée), puis entre 50 et 120 $\text{mm}\cdot\text{h}^{-1}$ à T1 (modéré-rapide à rapide). En T2, les infiltrabilités sur les rangs conservent cette dynamique tandis que les infiltrabilités sur les rangs présentent des résultats inférieurs. Dans le contexte étudié, cette progression est compatible avec une meilleure continuité porale de surface, possiblement liée aux différentes opérations de travail du sol successives.

Dynamique du carbone, activité microbienne et cycle des nutriment

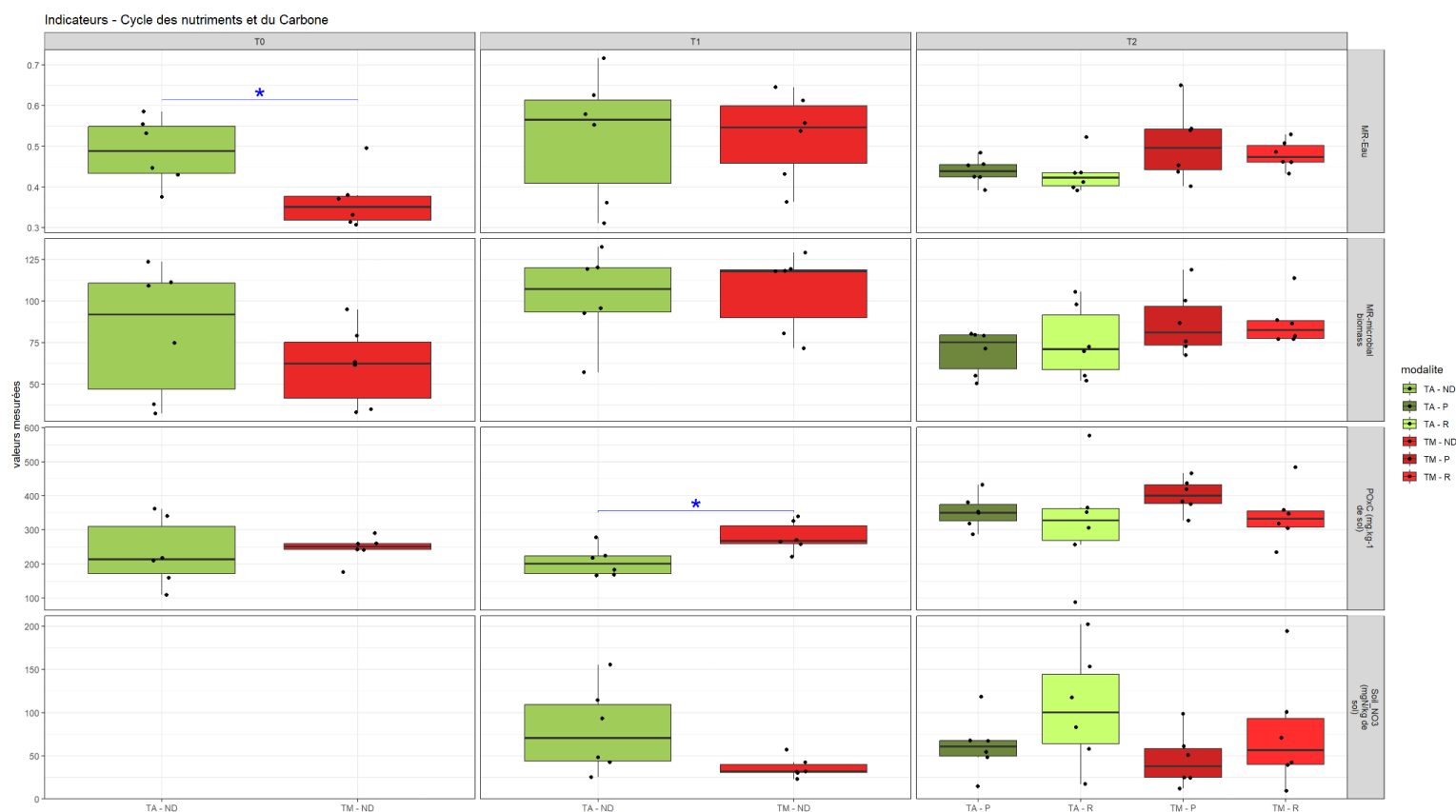


Figure 3 : Boxplots des mesures de respiration basale (MR-Eau : $\mu\text{gC/gsol sec/h}$) et de biomasse microbienne, POxC (mgC/kg de sol) et NitraTest (mgN/kg de sol) pour les campagnes T0, T1 et T2 par modalité. Les boîtes représentent les premier, second (médiane) et le troisième quartiles. Il n’y a pas eu de mesure de nitrate en T0.

Concernant l’activité microbienne, on observe une tendance à de meilleurs résultats en TA à T0, qui s’estompe en T1 et tend à s’inverser en T2.

Le carbone oxydable au permanganate (POxC) se situe à T0 entre 200 et 300 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, ce qui correspond, pour un limono-sableux au sol nu, à un niveau bas à bas-moyen. À T1, une divergence apparaît entre modalités : la plage observée en TA ($\approx 175\text{--}215 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$) suggère une baisse par rapport à T0, tandis que TM se maintient ou progresse légèrement ($\approx 250\text{--}300 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$). La tendance se conserve en T2, avec des mesures qui augmentent.

Au contraire, les mesures de nitrates montrent une tendance inverse avec de meilleurs résultats en T1, d’autant plus marqué sur la butte (résultat attendu car de l’engrais a été apporté sur les rangs de culture entre T1 et T2). Pénétrromètre et humidité (suivis travail du sol)

Calcul des paramètres pour la normalisation

Dans cette partie, nous porterons l’attention sur la description de la méthode de normalisation des données pénétrométriques. Les données utilisées seront les mesures pénétrométriques et d’humidité réalisées à huit dates différentes.

Dans un premier temps, on calcule le “b” de l’équation normalisée pour les 3 profondeurs que l’on a (0-10cm | 10-20cm | 20-40cm) :

```
Call:
lm(formula = log(Q_mesure) ~ log(theta_mesure), data = .)

Residuals:
    Min       1Q   Median       3Q      Max
-3.2987 -0.2246  0.1178  0.3633  1.1291

Coefficients:
              Estimate Std. Error t value Pr(>|t|)
(Intercept)    9.08892    0.15828   57.42  <2e-16 ***
log(theta_mesure) -0.57115    0.06711   -8.51  <2e-16 ***
---
Signif. codes:  0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1

Residual standard error: 0.5745 on 562 degrees of freedom
Multiple R-squared:  0.1142,    Adjusted R-squared:  0.1126
F-statistic: 72.42 on 1 and 562 DF,  p-value: < 2.2e-16
```

Figure 5 : Résultat de la régression linéaire réalisé pour la profondeur 20-40cm

Ici, on part que la formule empirique pour obtenir une équation sous forme d'une fonction linéaire : $\log(Q_{mesurée}) \sim \log(\theta_{mesuré}) * b + \log(a)$, puis on réalise une régression linéaire. On obtient : $b = 0,57115$ ($= -\log(\theta_{mesuré})$).

On réalise de la même manière les régressions pour les deux autres profondeurs. Au final on obtient 3 coefficients qui serviront pour la normalisation des données.

La normalisation se fait en suivant cette formule : $Q_{normalisée} = Q_{mesurée} \times \left(\frac{\theta_{ref}}{\theta_{mesurée}}\right)^b$, ou intervient la résistance mesurée ($Q_{mesurée}$), l'humidité mesurée ($\theta_{mesurée}$), l'humidité de référence θ_{ref} , et le coefficient calculé b . Dans notre cas, l'humidité de référence a été choisie comme la moyenne des humidités, ce qui reflète les conditions moyennes du sol.

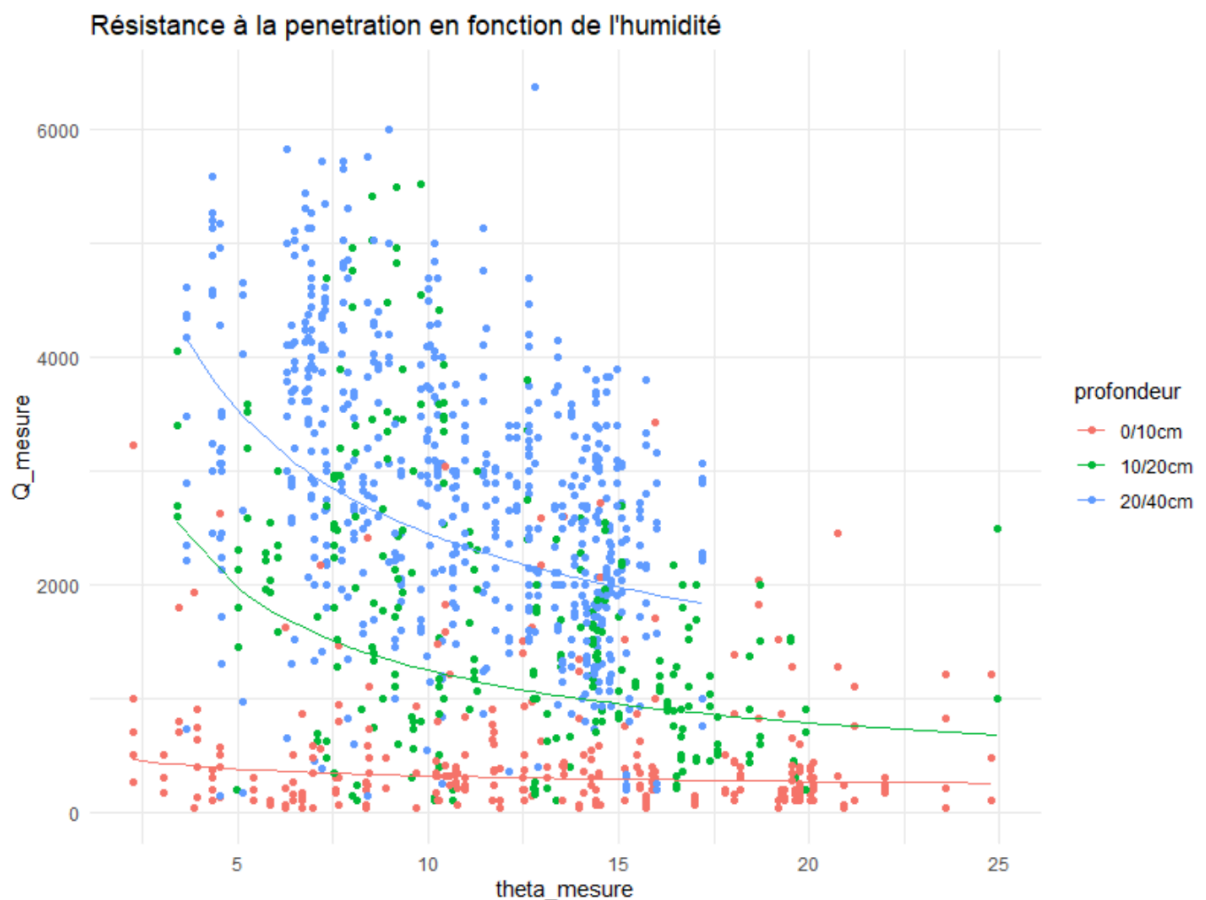


FIGURE 6 : Dispersion des mesures et courbes de régression. Q_{mesure} : résistance (kPa) mesurée - θ_{mesure} : humidité mesurée

Sur ce graphique, nous pouvons voir la dispersion des points en termes de résistivité et d'humidité en fonction de la profondeur, ainsi que les courbes de régressions. On observe que les points sont plutôt regroupés par profondeur le long de l'axe des résistances. Les courbes de régression nous informe que pour toutes les profondeurs, une baisse de l'humidité résulterait en une augmentation de la résistance à la pénétration, effet qui s'accroît avec la profondeur.

Application de la normalisation aux données

Maintenant que le paramètre est trouvé, nous pouvons calculer $Q_{\text{Normalisé}}$ en posant l'humidité de référence à 11.45%. Ce choix a été fait car il représente la moyenne des humidités mesurées sur toutes les campagnes.

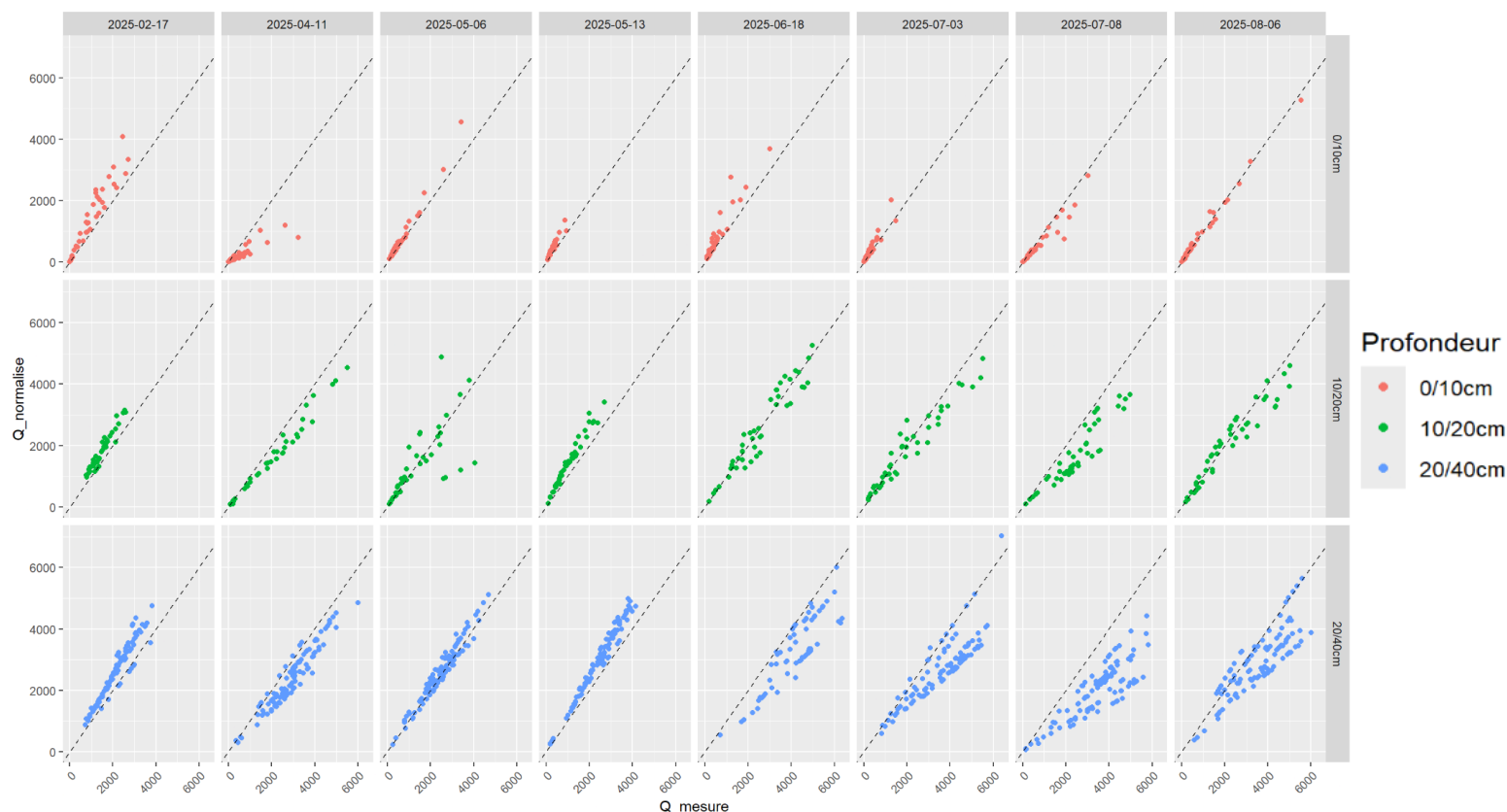
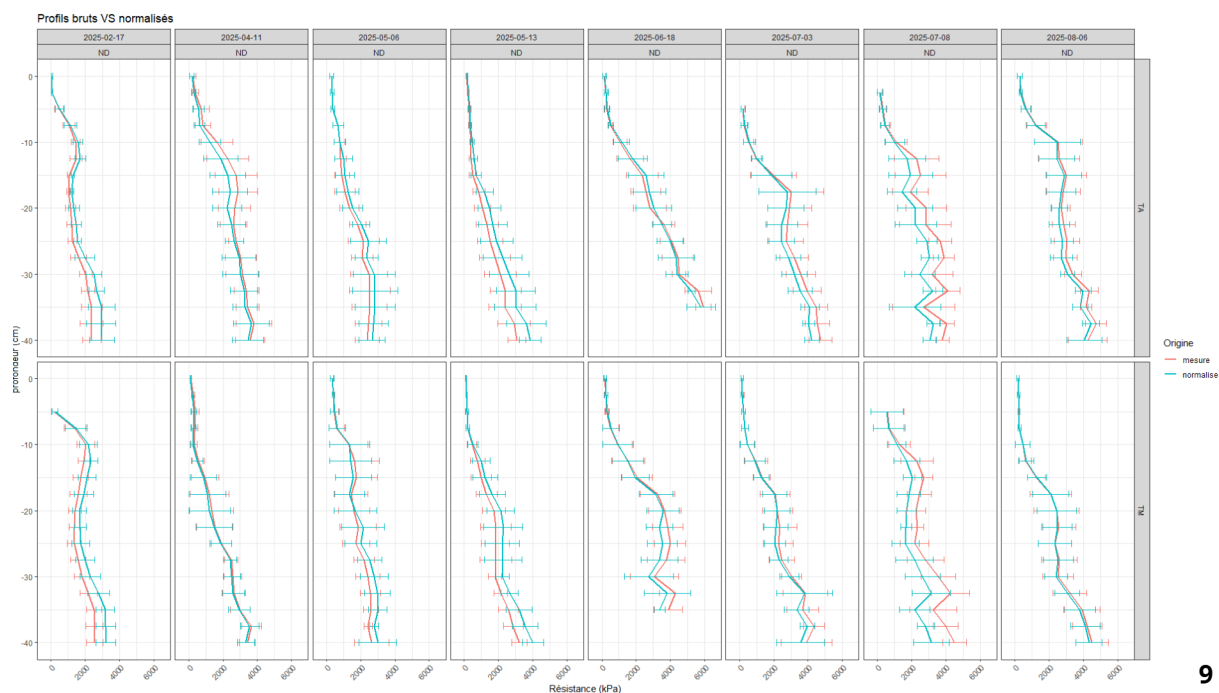


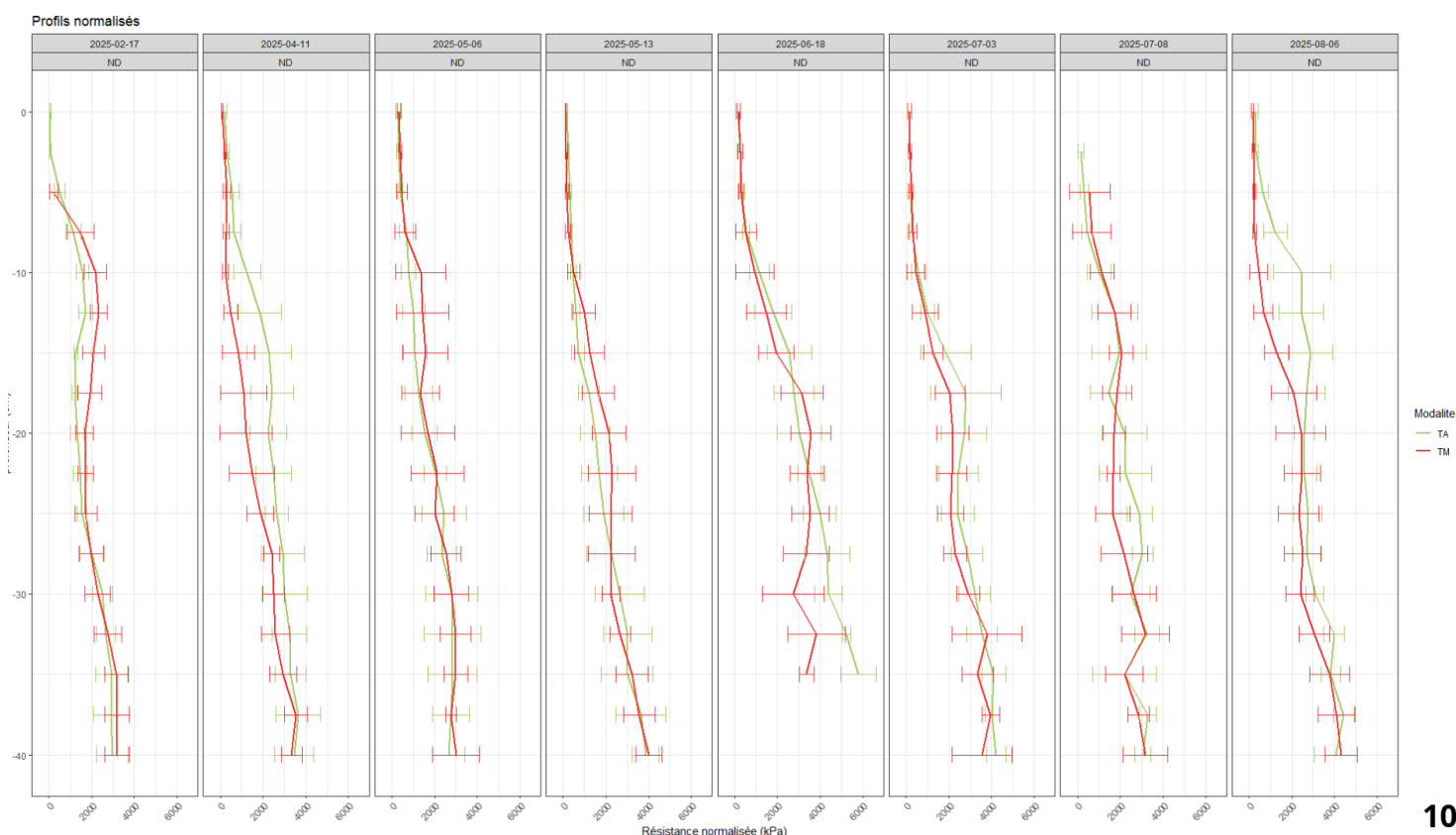
FIGURE 7 : Graphique de visualisation des résistances mesurées comparée aux résistances calculées grâce à la normalisation. La droite affine pointillée représente la médiane : un point sur cette droite à la même valeur mesurée et calculée.

Lorsque les points sont au-dessus de la droite affine, cela signifie que la résistance normalisée est supérieure à la résistance mesurée. Cela revient à dire que le taux d'humidité mesuré est supérieur au taux d'humidité de référence choisi, ce qui est globalement le cas pour les points en surface et pour les premières dates. Cette tendance s'inverse lorsqu'on s'intéresse aux points plus en profondeur et à des dates plus tardives.



9

FIGURE 8 : Comparaison par date et modalité des profils pénétrométriques mesurés avec les profils pénétrométriques normalisés. Les barres d'erreur sont calculés avec la formule " $SE \cdot 1.96$ ", ce qui représente l'intervalle de confiance à 95% (IC95)



10

Figure 9 : Comparaison des mesures pénétrométriques entre TA et TM à plusieurs dates ; Les barres d'erreur sont calculés avec la formule " $SE \cdot 1.96$ ", ce qui représente l'intervalle de confiance à 95% (IC95). Les profils sont tracés lorsqu'au moins 4 des 6 pseudo-répétitions présentent une mesure, ce qui en raccourcit certains.

On constate bien que les points de surface varient peu, et que les différences sont surtout visibles pour les points en profondeur. Cela s'explique car le climat étant assez sec, le taux d'humidité dans le sol n'est pas homogène. Dans un tel climat, sans action liée à la culture, un gradient d'humidité positif aurait été observé en profondeur. Mais ici ce n'est pas le cas à cause des irrigations apportées pour permettre le travail du sol. Ainsi les couches superficielles ont un taux d'humidité plus élevé grâce à l'irrigation, et les couches plus profondes sont plus sèches car les faibles quantités d'eau apportées ne sont pas suffisantes pour pénétrer en profondeur.

Interprétation des données normalisées

Initialement, à T0, le sol était plutôt homogène (2025-02-17) entre TA et TM ainsi qu'au sein de la parcelle, avec TM légèrement plus résistant à la pénétration aux alentours de 15 cm. Après le labour (2025-04-11), on observe une grosse diminution de la résistance en TM et TA allant jusqu'à une division par 4 sur une profondeur de 10 cm. De plus, on observe en tendance que TA a été moins décompacté que TM, on pourrait penser que c'est dû à la modalité de travail employant un outil proposant un travail moins fin. Pour les relevés suivants (2025-05-06 au 2025-07-08), on retrouve des données homogènes entre TA et TM. Pour notre dernière mesure (2025-08-06), on observe une résistance plus importante en TA qu'en TM sous la surface. Cette différence questionne, car entre cette mesure et la précédente, le sol était occulté et aucun développement végétal n'était possible ni même aucune infiltration d'eau. On pourrait donc penser qu'après le retrait de la bâche et l'irrigation précédent le travail du sol, les conditions hydro-physiques en TA étaient moins résilientes qu'en TM, induisant cette différence de compaction.

c) Données encore non analysables

Certains indicateurs n'ont pas encore fait l'objet de mesure ou ne sont pas encore analysés (comme la mesure de Bait Lamina qui a été réalisée le 14/11/2025). Les suivis de travail du sol et la prise en note des actions et commentaires des opérateurs ne sont en l'état pas capables de nous fournir des informations. Ils seront utiles plutôt lors de la discussion des résultats pour résoudre de possibles points d'incohérence. Les relevés de rendement ou de qualité de la récolte n'ont pas encore été menés, mais devraient se dérouler courant décembre.

En conclusion, les distributions brutes indiquent, en T0, un niveau de carbone faible à modéré, une structure globalement correcte à moyenne, une stabilité d'agrégats élevée en surface et des vitesses d'infiltration initialement modestes. En T2, l'augmentation de l'infiltration surtout sur les buttes de cultures et le maintien d'une bonne stabilité superficielle sont des signaux positifs pour la fonction "structure - hydrodynamique", tandis que la dynamique de POxC diverge entre TA et TM. De plus amples analyses statistiques permettront l'analyse de l'évolution temporelle des indicateurs, applicable notamment à l'évolution de la résistance à la pénétration.

5) Discussion et Analyse critique

La discussion replace les résultats obtenus dans le cadre des objectifs initiaux : apprécier les effets comparés de la traction animale (TA) et motorisée (TM) sur des fonctions clés du sol — structure et hydrodynamique, dynamique du carbone et activité microbienne — en conditions méditerranéennes sur sol limono-sableux. Nous proposons d’abord une lecture transversale des signaux T0 à T1, puis nous discutons des limites méthodologiques et des implications agronomiques et organisationnelles.

a) Rappel des objectifs et hypothèses opérationnelles

L’hypothèse centrale est qu’une réduction des charges par essieu et des pressions de contact sous TA limite la compaction, ce qui améliore la continuité porale et, par conséquent, l’infiltration, la rétention utile et l’activité biologique. À l’inverse, des passages plus lourds et concentrés sous TM peuvent accroître le risque de compaction, en particulier aux interfaces de travail, avec des effets pouvant persister au-delà de la saison.

b) Lecture transversale des résultats (T0, T1 et T2)

Pour la comparaison entre nos résultats et la bibliographie, on rappelle que notre sol est de type limono-sableux (Sandy loam) et qu’on se trouve dans un climat méditerranéen (Normales annuelles entre 1991 et 2020 : 600 mm en 55 jours et 11.6°C - 20.5°C pour les moyennes minimales et maximales de température). ([Météo-France - Perpignan, 2025](#)), données complétées par la station météo du site d’Alénia (annexe 16). Nous utiliserons un guide général pour discuter de la signification d’une mesure sur la santé des sols ([Moebius-Clune et al., 2016](#)) ainsi que certains documents plus spécifiques au cas par cas.

Le premier enseignement concerne la fonction hydrodynamique. L’augmentation des vitesses d’infiltration entre T0 ($\approx 10\text{--}50 \text{ mm}\cdot\text{h}^{-1}$) et T2 ($\approx 50\text{--}100 \text{ mm}\cdot\text{h}^{-1}$) suggère que la continuité porale de surface s’est améliorée, ce qui est cohérent avec les très bonnes notes de Slake Test en surface. De plus, la diminution des vitesses d’infiltration dans les passages (autant en TA qu’en TM) indiquent un état structural meilleur sur les buttes. On observe également que l’infiltration est meilleure dans le passage en TA que dans le passage en TM. Cela pourrait indiquer un impact plus faible de la modalité de traction sur cet indicateur. En somme, une infiltration plus rapide, à texture égale, réduit mécaniquement le risque de ruissellement et de formation de croûtes, surtout en contexte méditerranéen soumis à des événements pluvieux ponctuels mais intenses.

Sur le plan structural, les scores VESS se maintiennent dans une zone intermédiaire ($\approx 2,6\text{--}3,3$), que l’on cherchera à abaisser pour sécuriser l’enracinement et la porosité fonctionnelle de l’horizon de culture ([Kansas State University, s.d.](#)). La combinaison « VESS voisin de 3 » et « Slake superficiel $\geq 5,5$ » dessine un profil de sol où la cohésion des agrégats est bonne ([Herrick et al., 2001](#)), mais où des éléments de compaction ou de densification locale peuvent encore limiter l’accessibilité des pores les plus efficaces pour l’infiltration et les échanges gazeux. Les courbes de résistances à la pénétration vont également dans ce sens (estimation au vu des données antérieures et postérieures à la campagne T1 car la normalisation des mesures pénétrométriques n’a pas encore pu être réalisée). Bien que les 10 premiers centimètres présentent une résistance acceptable (moins de 1000 à 1500 kPa), les horizons inférieurs sont plus compacts, ce qui pourrait être une source d’explication des scores moyens de compaction allant de 2000 à 4000 kPa. ([Singh et al., 2015](#) ; [Unger & Kaspar, 1994](#) ; [Rosolem et al., 2002](#))

Du côté de la dynamique du carbone, les niveaux de POxC restent faibles à modérés pour ce type de sol au T0, et divergent au T1 entre modalités : baisse en TA ($\approx 175\text{--}215 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$) et maintien/hausse en TM ($\approx 250\text{--}300 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$). Indépendamment des causes immédiates (effets de gestion, dynamique de résidus, périodes sèches), la priorité agronomique demeure l'augmentation de l'apport en carbone frais et diversifié (couverts multi-espèces, restitutions organiques) afin de soutenir l'activité microbienne et la stabilité structurale dans la durée. (*Nunes et al., 2024*)

Enfin, les mesures issues des MicroResp (respiration basale et biomasse microbienne) n'indiquent pas de contraste marqué entre modalités mais une tendance à une activité plus importante en TM qu'en TA, avec une diminution globale entre T0 et T2.

c) Analyse statistique et scoring

Une analyse en composantes principales (ACP) a été réalisée sur l'ensemble des indicateurs mesurés (POXC, VESS, MR-Eau, densité apparente, Slake Test – surface et profondeur –, Beerkan Iterm). Les ACP ont été construites pour (i) l'ensemble des données T0, T1 et T2, puis (ii) uniquement pour T1 et T2, afin d'examiner l'effet potentiel d'un contraste initial marqué entre T0 et les deux campagnes suivantes. Ensuite a été réalisé le scoring résultant en un SHI global.

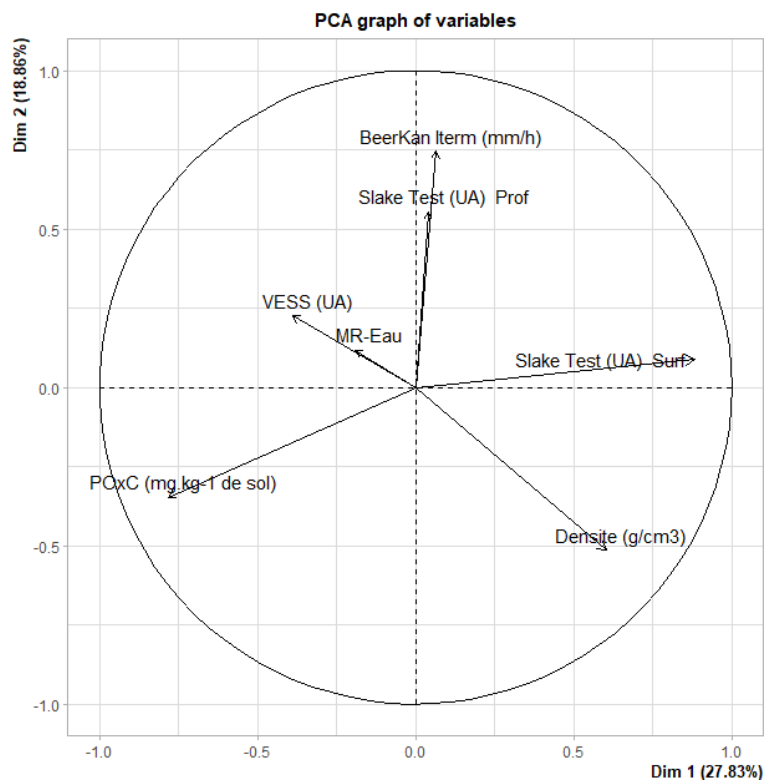


Figure 9 : ACP 1 - Ensemble des données (T0, T1, T2)

L'ACP (figure 9) réalisée sur les trois temps montre deux tendances.

Dim 1 (27,83 % de variance) oppose principalement :

- La variable de stabilité structurale en surface et la densité apparente (fortement corrélée positivement à Dim 1)
- Le POxC fortement anti-corrélé à la Dim 1.

Dim 2 (18,85 %) sépare notamment :

- Beerkan Iterm (mm/h) et Slake Test profondeur, associés positivement à Dim 2.
- Le POxC et la densité corrélées négativement.

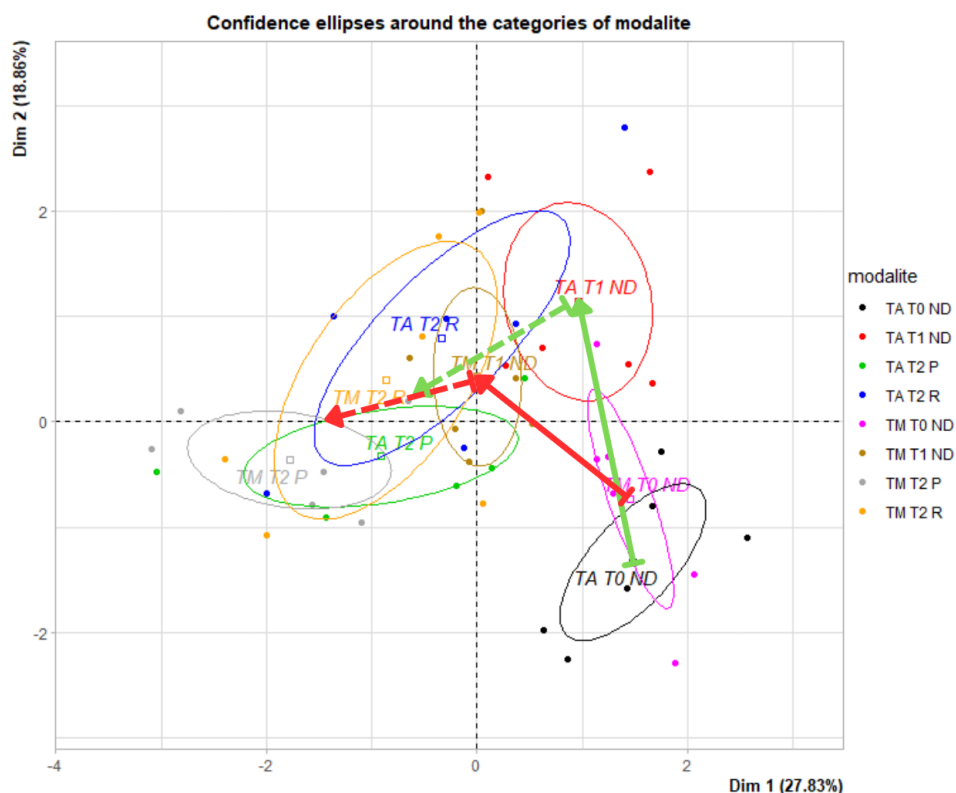


Figure 10 : ellipses de confiance sur les points regroupé par modalité, campagne et type commun.

Le type peut être ND : Non différencié - R : Butte (Ridge) - P : Passage

La distribution des points (figure 10) expose principalement 2 clusters. D'un côté la campagne T0, de l'autre les campagnes T1 et T2 plus proches. Cette structuration nous informe que la campagne T0 est marquée par une densité plus importante, ce qui est cohérent car le sol n'était pas encore travaillé. Les campagnes T1 et T2 sont rapprochées dans l'espace, ce qui suggère une réponse plus similaire des indicateurs comparées à T0 : il y a eu une différenciation du sol, due à la remise en culture de la terre.

Une hypothèse est que la forte dissimilarité initiale entre T0 et les campagnes suivantes domine la variance totale, ce qui crée un effet de masque. Les différences fines entre T1 et T2 sont masquées dans cette première ACP, car la variabilité T0–(T1,T2) est beaucoup plus importante que la variabilité T1–T2. C'est ce qui nous a poussé à faire une ACP uniquement sur les campagnes T1 et T2, pour observer les dynamiques entre ces deux campagnes.

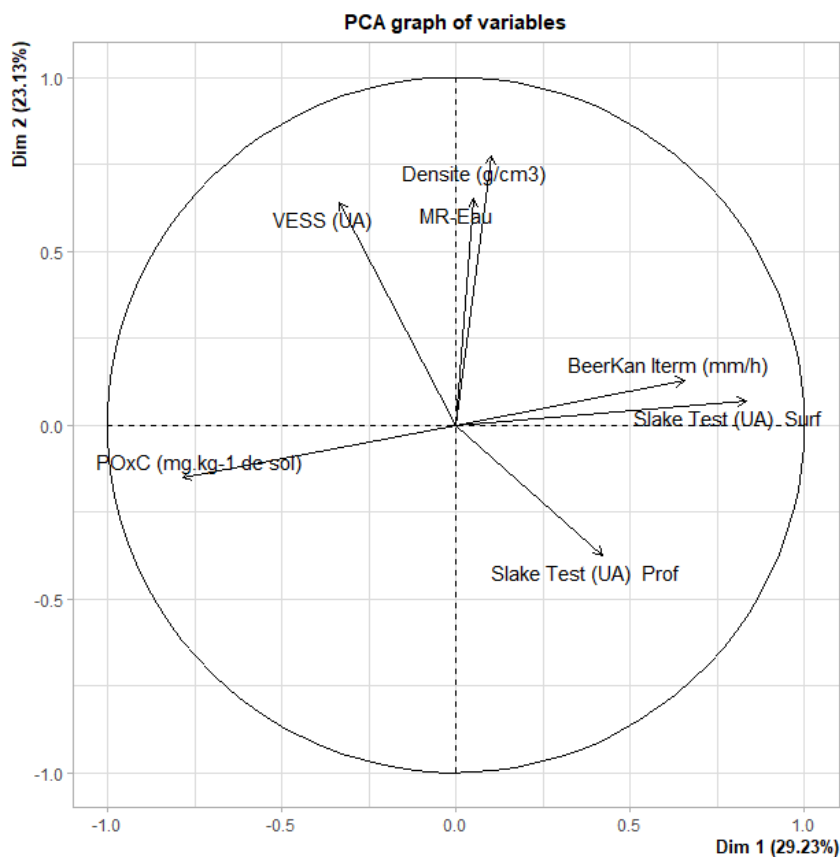


Figure 11 : ACP 2 - Données restreintes à T1 et T2

L'ACP (figure 11) réalisée uniquement sur T1 et T2 modifie sensiblement la lecture. La structure globale des corrélations reste similaire à celle de l'ACP précédente.

Dim 1 (29,23 %) reste principalement structuré par un axe opposant :

- Stabilité structurale (Slake Test) et Beerkan Iterm (côté positif),
- POXC (côté négatif).

La Dim 2 (23,13 %) est influencée par :

- La densité apparente, MR-Eau et VESS, corrélés positivement.
- Les indicateurs Slake Test Profondeur, corrélés négativement.

En supprimant T0, l'ACP fait apparaître (figure 12) une séparation nette entre T1 et T2, ainsi qu'une différence entre TA et TM notamment en T2 sur la butte, ce qui n'était pas visible auparavant. Cela fait ressortir une différence entre T1 et T2, qui est toutefois négligeable devant la différence avec l'état initial T0.

Cette seconde ACP est intéressante, car on peut observer la direction que prend chaque modalité après la différenciation. On retrouve une direction commune entre l'état initial à T1 et l'état différencié en butte ou en inter-butte (passage) : les traits pointillés et continus sont plus ou moins parallèles entre TA et TM. Cela pourrait indiquer que l'effet de la pratique culturale est pour l'instant, prépondérant sur l'effet de la modalité de traction. On observe toutefois une différence marquée en T2 sur la butte entre la modalité TM et TA. Cette différence est retrouvée de manière significative lors du calcul du SQI total.

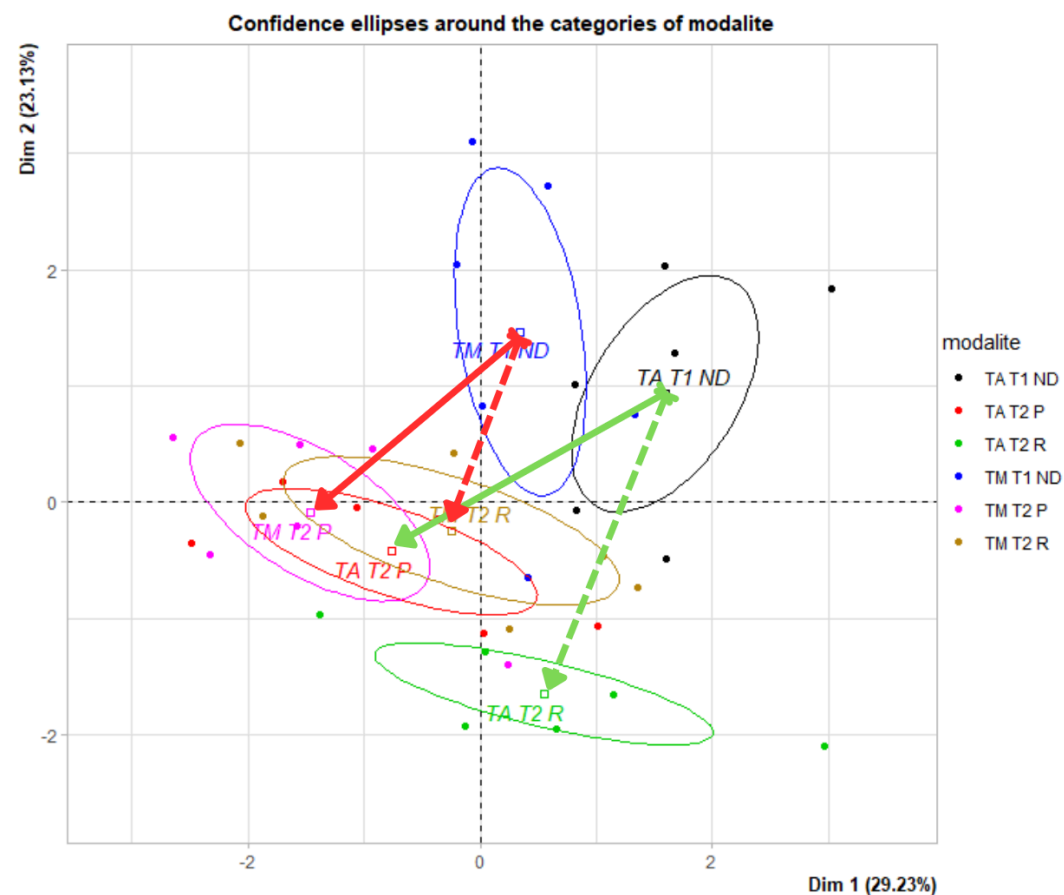


Figure 12 : ellipses de confiance sur les points regroupé par modalité, campagne et type commun.

Le type peut être ND
: Non différencié - R
: Butte (Ridge) - P :
Passage

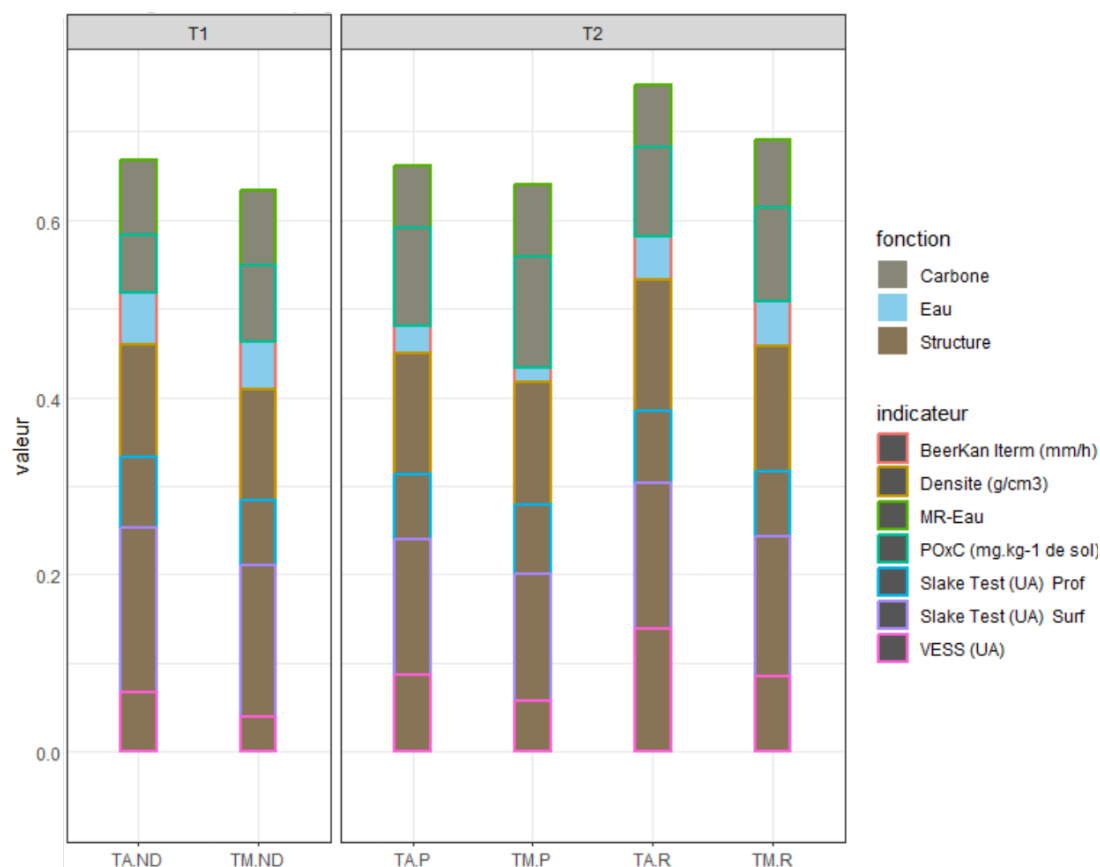


Figure 13 : Scoring sur les campagnes T1 et T2

Le type peut être ND
: Non différencié - R
: Butte (Ridge) - P :
Passage

Minimum Significant Difference: 0.1040283

Treatments with the same letter are not significantly different

			SQI_Total	groups
TA	T2	R	0.7529650	a
TM	T2	R	0.6913615	ab
TA	T1	ND	0.6676270	ab
TA	T2	P	0.6615254	ab
TM	T2	P	0.6395624	b
TM	T1	ND	0.6339527	b

Figure 14 : Test statistique : différence sur le SQI total

Le type peut être ND : Non différencié - R : Butte (Ridge) - P : Passage

Ici les données ont été normalisées suivant la méthode décrite plus haut. Elles ont ensuite été intégrées dans l'indice global de santé des sols (SHI - figure 13). Cet indice permet facilement d'apercevoir les différences entre plusieurs modalités. Ici, cet indice nous permet de conclure sur le fait que la modalité TA dans le contexte de butte à la campagne T2 présente une meilleure santé des sols que la modalité TM à la même campagne en contexte de passage (figure 14). On observe également une tendance à de meilleurs score pour la modalité TA par rapport à la modalité TM lorsqu'on compare des contextes équivalents (campagne et différenciation culturale ND-R-P)

d) Incertitudes et biais possibles

Plusieurs sources d'incertitude doivent être explicitement prises en compte. Premièrement, la variabilité intra-parcellaire : les représentations normalisées à la moyenne montrent une dispersion généralement contenue (quartiles dans $\pm 25-50\%$), mais cette appréciation doit être confirmée par des tests d'homogénéité de variance et par une modélisation emboîtée permettant d'identifier d'éventuels effets de blocs. L'observation de la parcelle et les ressentis des opérateurs lors des interventions pourraient laisser penser que le début et la fin de la parcelle (dans les deux modalités) ne sont pas homogènes. En effet, les parcelles sont légèrement en pente, ce qui provoque une plus forte accumulation d'eau en bout de parcelle. De plus, des gros patches d'adventices ont été remarqués dans le fond des parcelles vers cette zone plus humide. Cela pourrait influencer par exemple les mesures de POxC si plus de résidus ont été laissés lors des désherbages. Ou encore si les conditions d'humidité n'étaient pas les mêmes sur toute la parcelle, voir apparaître différentes communautés microbiennes ainsi qu'un gradient structural provoqué par le travail du sol dans différentes conditions. Deuxièmement, l'influence des conditions météorologiques et hydriques : la vitesse d'infiltration, la résistance à la pénétration et, dans une moindre mesure, les réponses microbiennes, sont sensibles à l'état hydrique au moment de la mesure. La documentation systématique de l'humidité du sol limite ces biais qui restent tout de même présents. Troisièmement, les limites intrinsèques des outils : le test VESS reste une évaluation experte et requiert une formation et un protocole rigoureux ; le Slake test est sensible à la préparation des agrégats ; Le test Beerkan informant sur l'infiltrabilité terminal, sans autre conversion, ne permet pas d'inférer directement le Ksat ; la pénétrométrie doit être interprétée après normalisation, avec une équation empirique ajustée sur les données (paramètre b et humidité de référence) ; les mesures de MicroResp se font en laboratoire quelques semaines après les relevés terrain. Cela implique donc un transport puis un stockage réfrigéré de la terre, un séchage, une ré-humidification, ainsi qu'une expérimentation avec des substrats apportés purifiés. Toutes ces conditions pourraient poser question sur la manière de transposer ces résultats expérimentaux obtenus en laboratoire avec la réalité de terrain.

e) Impacts organisationnels & agronomique

Au plan organisationnel, la mise en œuvre des opérations sous TA et TM diffère par les fenêtres d'intervention. En TM, ces interventions sont conditionnées par l'humidité de la parcelle. Une parcelle trop humide rend impossible l'entrée du tracteur sous peine de la création de ravine dans la parcelle ou une compaction accrue. En TA, la puissance de traction est limitée, imposant une fréquence de travail ajustée pour ne pas laisser le sol trop se compacter ou trop s'enherber sous peine de voir la difficulté du travail augmenter. De plus, la durée des interventions est fortement impactée par le mode de traction. En effet, des outils travaillant une plus grosse surface peuvent être utilisés en TM alors que l'on est limité sur le poids et la "résistance au sol" des outils en TA, ce qui influence la durée de travail entre modalités pour le même résultat souhaité. Concernant ces outils, les exigences de maintenance et les compétences mobilisées pour les utiliser divergent entre les modalités, nécessitant un opérateur formé dans les deux cas.

Ces facteurs conditionnent indirectement l'état structural du sol via le choix des créneaux (éviter les passages en conditions humides) et la répétition des trajets. Il y a notamment un risque accru de compactage en TM si l'opération est conduite sur un créneau inadapté.

Sur le plan agronomique, pour notre cas où nous possédons le matériel motorisé mais faisons appel à un intervenant en TA, l'organisation des opérations culturales est en principalement organisée autour des disponibilités de cet intervenant. Il se pose notamment la question pour le déclenchement des interventions de désherbage. Conventionnellement, le désherbage est décidé après l'observation d'une pression en adventices trop importante sur la parcelle avec une action rapide. Cependant, dans notre cas, cette méthode ne fonctionne pas. Il faudra soit anticiper l'état d'enherbement pour prévoir une intervention en TA, sous peine d'une intervention trop précoce ; soit réagir à l'évolution de l'enherbement, sous peine d'une intervention trop tardive.

Dans l'ensemble, les résultats suggèrent une amélioration de la fonction hydrodynamique au cours de la saison, un état structural globalement correct mais perfectible (VESS voisin de 3) et un niveau de carbone labile à renforcer. Les contrastes entre modalités, notamment sur POxC et sur l'infiltration, devront être confirmés par des analyses statistiques adaptées et par la conversion des essais Beerkan en Kfs. Les implications opérationnelles invitent à consolider les pratiques favorables à la porosité fonctionnelle (gestion des passages, couverture du sol) et à la dynamique du carbone (apports organiques et couverts), tout en tenant compte des contraintes de chantier propres à chaque modalité.

6) Perspectives d'évolution

Pour aller plus loin, un indicateur intéressant à regarder serait l'évolution du taux d'humidité. Bien que la comparaison du taux d'humidité entre deux dates de mesures n'ait pas trop de sens car il dépend en grande partie de la météo et de l'arrosage, nous pouvons considérer d'étudier l'évolution de l'humidité relative entre les parcelles au cours du temps. Nous pourrions par exemple étudier : " $\text{delta_TH} = \text{TH_TA\%} - \text{TH_TM\%}$ ". L'idée serait dans un premier temps de suivre l'évolution du signe de " delta_TH " et on pourrait même espérer trouver une manière d'obtenir des résultats en étudiant l'amplitude des variations. L'hypothèse derrière cet indicateur est que la pluviométrie est identique sur une zone de 800m² et que l'arrosage est apporté en simultané sur les deux parcelles. De plus, les facteurs pouvant influencer l'humidité du sol (comme la température, l'ensoleillement, le vent ...) sont aussi identiques entre les parcelles. Il serait donc envisageable de faire une comparaison relative qui nous permettrait d'avoir un indicateur indirect des fonctions du sol. En effet, la différence entre les deux parcelles est la modalité de travail du sol. On pourra donc observer l'influence de ces modalités de travail sur la ressource en eau au sein de la parcelle, et ainsi estimer la capacité des sols à infiltrer et retenir l'eau.

Il serait également intéressant de regarder si des différences intra-parcellaires existent, afin d'analyser et de comparer efficacement les mesures. Une première idée serait de faire la moyenne d'un indicateur toutes campagnes confondues pour chaque point. Ainsi, si des paternes ou différences notables ressortent, cela indiquera que des différences existent et sont à prendre en compte.

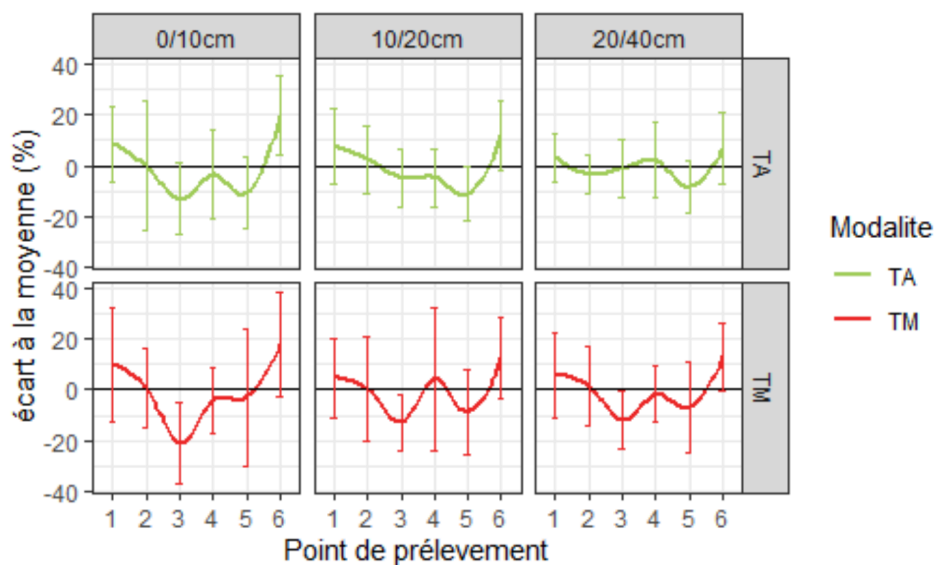


Figure 15 : Représentation des écarts à la moyenne (moyenne du point / moyenne globale) des humidités massiques à différentes profondeurs pour chaque point.

Sur l'exemple de l'humidité, on observe une tendance à des mesures plus faibles sur les points centraux de la parcelle, et des humidités plus importantes sur les deux extrémités. Cette tendance confirme les observations visuelles faites sur le terrain avec un fond de parcelle plus humide, associé avec une prolifération importante d'adventices et notamment de pourpier (*Portulaca Grandiflora*) connu pour aimer les milieux plus humides. Au vu de cette première observation, il serait judicieux de pousser l'analyse et de l'étendre aux autres indicateurs.

La mise en place récente du Bait Lamina apporte une nouvelle manière d'appréhender l'activité biologique du sol. Elle permet d'obtenir une information sur l'activité biologique le long des modalités, mais également avec une échelle verticale.

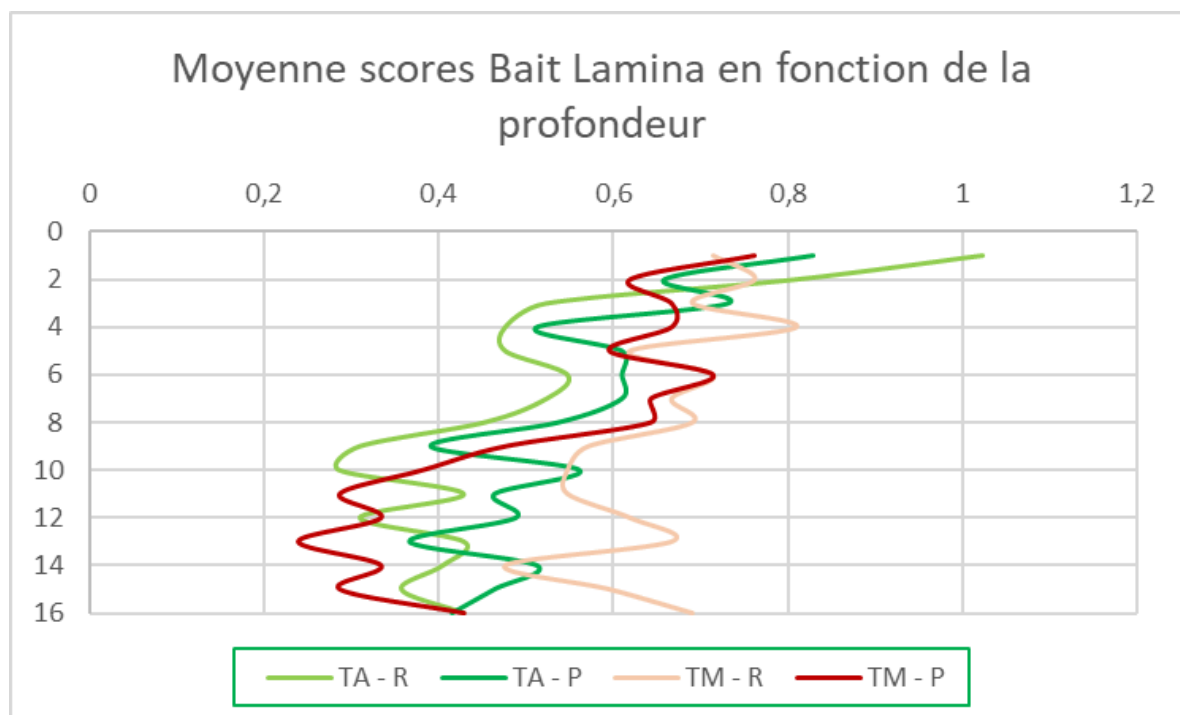


Figure 16 : Moyenne des scores de Bait Lamina. note de 0 : aucune dégradation - 1 : partiellement dégradé - 2 : totalement dégradé. Les valeurs en ordonnées de 1 à 16 représente le numéro des trous présents sur les Bait Lamina, avec le 1er sous la surface, le 16ème à huit cm de profondeur.

Sur ce graphique, on peut observer que les valeurs moyennes diminuent avec la profondeur. Cependant ces résultats restent encore bruts sans analyse statistique, les résultats sont donc à prendre avec recul.

Il serait également intéressant d'étudier l'évolution temporelle des courbes de pénétrométries au sein d'une parcelle. Cette observation pourrait nous permettre d'étudier l'influence des interventions de travail du sol, ainsi que l'évolution entre deux interventions. Cela pourrait nous permettre dans un premier temps de quantifier l'impact des interventions recherché sur les horizons de culture, puis d'étudier l'évolution plus en profondeur sur les horizons non travaillés (notamment observer s'il y a apparition d'une semelle plus compacte au dessous de la profondeur de travail).

Il sera nécessaire de travailler la modélisation du SHI, en incorporant les différents indicateurs avec une hiérarchisation de leur importance. Il faudra également réaliser des tests statistiques sur la corrélation les indicateurs, pour ne pas donner involontairement un poids trop important à un paramètre du sol. Le SQI du protocole BioFuncTool pourrait être un bon début car il reprend un bon nombre de nos indicateurs, mais il faudra ensuite le retravailler pour incorporer notamment les mesures de pénétrométrie. Dans l'idée, il existe une résistance à la pénétration optimale autour de 200-1200 kPa. Une résistance trop faible pourrait causer des problèmes d'érosion important avec un sol peu porteur, une résistance trop élevée cause des problèmes d'enracinement (typiquement, une racine exerce une pression de 1000 à 2000 kPa pour pénétrer le sol lors de sa croissance).

Pour obtenir un complément à la mesure BeerKan, un calcul de conductivité hydraulique verticale à saturation (K_s) via l'algorithme BEST existe, permettant d'estimer le comportement hydraulique du sol. Il pourrait être intéressant de tester cette méthode pour déterminer si elle fournirait des données valorisables dans notre expérience. (*BEST Soil Hydro, s.d. ; Bagarello et al., 2014*)

Une source importante de manque de données est observée lors des mesures de pénétrométrie. En effet, les mesures n'étant pas réalisées à la capacité au champs, il arrive régulièrement que certaines mesures soient impossibles car le sol est trop sec et donc trop résistant à la pénétration. Cependant, il existe des méthodes reposant sur des modèles d'IA entraînés pour générer artificiellement des données pour combler ces valeurs manquantes. Ces modèles pourraient à partir des valeurs mesurées à la même date à des profondeurs supérieures, et à partir des valeurs mesurées à la même profondeur à d'autres dates, estimer les valeurs manquantes. Ce qu'il faudrait éclaircir avant de commencer à élaborer ce modèle, c'est la cohérence d'une estimation des données manquantes à partir des données des dates voisines. La question qu'il faudrait d'abord se poser est : est-ce que la résistance à la pénétration est cohérente dans le temps (entre plusieurs dates) ainsi que le long du profil (à une même date). La réponse à cette question conditionnera la logique agronomique derrière un tel projet.

7) Conclusion

Au terme de ce stage, l'expérimentation menée à l'UE Maraîchage a permis de documenter les premiers effets comparés de la traction animale (TA) et motorisée (TM) sur la santé des sols en maraîchage biologique méditerranéen. Les résultats obtenus sur les campagnes T0, T1 et T2 montrent que les sols étudiés présentent initialement une structure correcte mais perfectible, associée à une faible disponibilité en carbone biodisponible. L'évolution des indicateurs à la campagne T2 suggère une amélioration des propriétés hydrodynamiques au fil des interventions de travail du sol (hausse des vitesses d'infiltration, maintien d'une bonne stabilité superficielle), tandis que des différences commencent à émerger entre modalités, notamment sur la dynamique du carbone oxydable (POxC) et en tendance sur certaines mesures de stabilité structurale ou d'activité biologique. Si ces résultats doivent être consolidés par la suite de l'expérimentation et par des analyses statistiques plus approfondies, ils soulignent déjà l'intérêt d'un suivi multi-indicateurs pour évaluer les effets contrastés des modes de traction sur la santé des sols. En l'état, la traction animale n'apparaît ni systématiquement supérieure ni défavorable sur l'ensemble des fonctions ; elle semble préserver la stabilité de surface et limiter certains risques de compaction via des charges plus faibles, mais n'assure pas à elle seule une meilleure trajectoire du carbone labile sur un temps court. L'indice global de santé des sols (SHI) nous permet d'entrevoir de meilleurs résultats pour la modalité traction animale, mais au regard des autres analyses, aucune conclusion ne peut encore être donnée. La réponse finale nécessite un suivi pluriannuel et l'agrégation multi-indicateurs (SHI) pour avoir une vision intégrée de la vitalité du sol et ainsi juger de l'ampleur et de la durabilité des effets.

Mon rôle au sein de l'équipe expérimentale a été d'assurer le suivi opérationnel quotidien du dispositif : organisation et réalisation des prélèvements, suivi des interventions culturales, gestion des bases de données et mise en place d'outils d'analyse (scripts R, normalisation des mesures pénétrométriques, fiches terrain normalisées, bases structurées). Ces missions m'ont placé au cœur de l'expérimentation et m'ont permis de contribuer directement à la fiabilité des résultats ainsi qu'à leur valorisation scientifique. Ce stage a également constitué une étape importante pour renforcer le lien entre le travail de terrain, l'analyse informatique et la réflexion méthodologique sur les indicateurs de santé des sols.

Sur le plan personnel, ce stage m'a permis d'acquérir des compétences techniques variées, allant de la mise en œuvre d'indicateurs agro-écologiques sur le terrain au suivi rigoureux avec documentation d'interventions. Cela m'a également permis de consolider mes compétences informatiques pour l'analyse de données ainsi que l'utilisation d'outils statistiques. J'ai également développé des aptitudes organisationnelles et relationnelles en travaillant en interaction avec des techniciens, chercheurs et prestataires extérieurs. Enfin, cette expérience a renforcé ma capacité à inscrire mon travail dans une réflexion scientifique plus large sur la transition agroécologique et sur l'émergence de pratiques alternatives visant à concilier viabilité agronomique et respect des sols. J'ai l'espoir que lors de la suite de ce stage, je puisse mettre en œuvre / tester et approfondir les pistes d'évolution que j'ai entrevues comme la mise en place d'un indicateur nouveau ou l'élaboration d'un modèle pour générer et remplacer des données manquantes. J'ai également hâte de pouvoir visiter les laboratoires d'EMMAH, ce qui me permettra de découvrir et d'améliorer mes compétences en manipulation en laboratoire, me permettant également d'avoir une vision plus complète sur les méthodes produisant des valeurs à partir des mesures de terrain.

En somme, le début de ce stage nous permet de penser que la traction animale peut constituer un levier intéressant pour préserver certaines fonctions du sol, tout en soulevant des enjeux organisationnels et agronomiques spécifiques. La poursuite de l'expérimentation sur plusieurs années permettra de préciser l'ampleur et la durabilité de ces effets, afin d'éclairer les choix futurs en matière de pratiques culturales durables.

8) Bibliographie et Annexes

a) Bibliographie

Bagarello, V., Di Prima, S., & Iovino, M. (2014). *A test of the Beerkan Estimation of Soil Transfer parameters (BEST) procedure*. *Geoderma*, 221–222, 20–27.

<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0016706114000421?via%3Dihub>

Bauer František, Petr Porteš, Adam Polcar, Jiří Čupera, Martin Fajman (2022). *Differences in the wheel loads and contact pressure of the in-furrow and on-land rear tractor tyres with mounted and semi-mounted ploughs*, *Soil and Tillage Research*, Volume 215, 2022, <https://doi.org/10.1016/j.still.2021.105190>

Bengough, A. G., McKenzie, B. M., Hallett, P. D., & Valentine, T. A. (2011). Root elongation, water stress and mechanical impedance. *Journal of Experimental Botany*, 62(1), 59–68.

<https://doi.org/10.1093/jxb/erq350>

BEST Soil Hydro. (s.d.). *BEST Infiltrrometer — BEST method (product page)*.

<https://bestsoilhydro.net/infiltrrometer/> (consulté le 28 août 2025).

Busscher, W. J. (1990). *Adjustment of flat-tipped penetrometer resistance data to a common water content*. *Transactions of the ASAE*, 33(2), 519–524.

https://search.nal.usda.gov/permalink/01NAL_INST/27vehl/alma9915684053807426

Cambi, M., Certini, G., Neri, F., & Marchi, E. (2015). *The impact of heavy traffic on forest soils: A review*. *Forest Ecology and Management*, 338, 124–138.

<https://doi.org/10.1016/j.foreco.2014.11.022>

Carlos M.P. Vaz, Juliana M. Manieri, Isabella C. de Maria, Markus Tuller, (2011)

Modeling and correction of soil penetration resistance for varying soil water content, *Geoderma*, Volume 166, Issue 1, 2011, Pages 92-101,

<https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2011.07.016>.

Chamen, W. C. T. (2015). *Controlled Traffic Farming—From worldwide research to adoption in Europe*. *Agricultural Engineering International: CIGR Journal* (Special Issue).

<https://doi.org/10.1515/ata-2015-0014>

Chehaibi, S. & Khelifi, Mohamed & Boujelban, A. & Abrougui, Khaoula. (2012). Effects of tire inflation pressure and field traffic on compaction of a sandy clay soil as measured by cone index and permeability. *Canadian Biosystems Engineering*. 54. 2.9-2.15. 10.7451/CBE.2012.54.2.9. <https://doi.org/10.7451/CBE.2012.54.2.9>

Cousin Isabelle, Maylis Desrousseaux, Denis Angers, Laurent Augusto, Jean-Sauveur Ay, et al. (2025). *Préserver la qualité des sols : vers un référentiel d'indicateurs*. Rapport d'étude. INRAE. 2025, <https://dx.doi.org/10.17180/qnpx-x742>

- Faramarzi, B., Nguyen, A., & Dong, F.** (2018). *Changes in hoof kinetics and kinematics at walk in response to hoof trimming: pressure plate assessment*. Journal of veterinary science, 19(4), 557–562. <https://doi.org/10.4142/jvs.2018.19.4.557>
- García-Tomillo, A., de Torres, I., & Hernanz, J. L.** (2017). *Comparing effects of tillage treatments performed with animal traction and light tractors on soil compaction and crop yield*. Open Agriculture, 2(1), 332–341. <https://doi.org/10.1515/opag-2017-0036>
- Håkansson, I., & Reeder, R. C.** (1994). *Subsoil compaction by vehicles with high axle load—Extent, persistence and crop response*. Soil and Tillage Research, 29(2–3), 277–304. [https://doi.org/10.1016/0167-1987\(94\)90065-5](https://doi.org/10.1016/0167-1987(94)90065-5)
- Hamza, M. A., & Anderson, W. K.** (2005). *Soil compaction in cropping systems: A review of the nature, causes and possible solutions*. Soil and Tillage Research, 82(2), 121–145. <https://doi.org/10.1016/j.still.2004.08.009>
- Herrick, J. E., Whitford, W. G., de Soyza, A. G., Van Zee, J. W., Havstad, K. M., Seybold, C. A., & Walton, M.** (2001). Field soil aggregate stability kit for soil quality and rangeland health evaluations. *Catena*, 44(1), 27–35. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0341816200001739?via%3Dihub>
- Keller, T., Sandin, M., Colombi, T., Horn, R., & Or, D.** (2022). Farm vehicles approaching weights of sauropods exceed safe mechanical limits for soil functioning. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 119(21), e2117699119. <https://doi.org/10.1073/pnas.2117699119>
- Keller, J., Canches, G., Monnerie, C., Sandillon, C., Ballade, J., & Poizat, T.** (2010). *Manuel de traction animale moderne*. Ariège : PROMMATA. <https://doc-developpement-durable.org/file/Culture/Outils-&-bonnes-pratiques-travail-de-la-Terre/outils-agricoles-simples/ManuelDeTractionAnimaleModerne.pdf>
- (Association).** (s.d.). *Matériel Agricole Moderne à Traction Animale (MAMATA) – Catalogue & fiches techniques*. <https://www.prommata.org>
- Logan, A. A., Starke, S. D., Weller, R., & Pfau, T.** (2021). *Impact of Gait and Diameter during Circular Exercise on Front Hoof Area, Vertical Force, and Pressure in Mature Horses*. Animals, 11(12), 3497. <https://doi.org/10.3390/ani11123581>
- Météo-France.** (2025). *Climat – Perpignan (normales et relevés)*. <https://meteofrance.com/climat/france/occitanie/PERPIGNAN>
- Moebius-Clune, B. N., et al.** (2016). *Comprehensive Assessment of Soil Health – The Cornell Framework* (3rd ed.). Cornell University. <https://www.css.cornell.edu/extension/soil-health/manual.pdf>
- Nunes, M. R., Veum, K. S., Parker, P. A., Holan, S. H., Amsili, J. P., van Es, H. M., Wills, S. A., Seybold, C. A., & Karlen, D. L.** (2024). SHAPEv1.0: Scoring curves and peer group benchmarks for dynamic soil health indicators. *Soil Science Society of America Journal*, 88(3), 858–875. <https://acsess.onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/saj2.20668>

Rosolem, C. A., Foloni, J. S. S., & Tiritan, C. S. (2002). Root growth and nutrient accumulation in cover crops as affected by soil compaction. *Soil & Tillage Research*, 65(1), 109–115.

<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0167198701002860?via%3Dihub>

Schwanghart H. (1991), Measurement of contact area, contact pressure and compaction under tires in soft soil, *Journal of Terramechanics*, Volume 28, Issue 4, 1991, Pages 309-318, [https://doi.org/10.1016/0022-4898\(91\)90012-U](https://doi.org/10.1016/0022-4898(91)90012-U)

Shaheb, M. R., Venkatesh, R., & Shearer, S. A. (2021). A Review on the Effect of Soil Compaction and its Management for Sustainable Crop Production. *Journal of Biosystems Engineering*, 46, 417–439.

<https://doi.org/10.1007/s42853-021-00117-7>

Singh, J., Salaria, A., & Kaul, A. (2015). Impact of soil compaction on soil physical properties and root growth: A review. *International Journal of Food, Agriculture and Veterinary Sciences*, 5(1), 23–32.

https://www.researchgate.net/publication/276253675_Impact_of_soil_compaction_on_soil_physical_properties_and_root_growth_A_review

Thoumazeau Alexis, Cécile Bessou, Marie-Sophie Renevier, Jean Trap, Raphaël Marichal, Louis Mareschal, Thibaud Decaëns, et al. (2019). « Biofunctool®: A New Framework to Assess the Impact of Land Management on Soil Quality. Part A: Concept and Validation of the Set of Indicators ». *Ecological Indicators* 97 (février):100-110.

<https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2018.09.023>

Unger, P. W., & Kaspar, T. C. (1994). Soil Compaction and Root Growth: A Review. *Agronomy Journal*, 86, 759–766.

<https://access.onlinelibrary.wiley.com/doi/10.2134/agronj1994.00021962008600050004x>

Védie, H., et al. (2009). *Planches permanentes en maraîchage biologique : Étude multi-site.* Carrefour de l'Innovation Agronomique, INRA. <https://dx.doi.org/10.17180/bwya-8h05>

Wininton M. da Silva; Aloísio Bianchini; Cesar A. da Cunha (2016). *Modeling and correction of soil penetration resistance for variations in soil moisture and soil bulk density.* Scielo Brazil.

<https://doi.org/10.1590/1809-4430-Eng.Agric.v36n3p449-459/2016>

Bibliographie complémentaire

Mise en place du MicroResp -

UMR EMMAH. (2024). *Mesure de micro-respiration du sol (MicroResp™) : fiche méthode (basal & SIR), références Campbell 2003 / Chapman 2007.* Avignon : INRAE – Université d'Avignon.

<https://umremmah.fr/outils-experimentations-plateforme-de-modelisation/methodes/mesures-de-micro-respiration-du-sol>

Campbell, C. D., Chapman, S. J., Cameron, C. M., Davidson, M. S., & Potts, J. M. (2003). A rapid microtiter plate method to measure CO₂ from carbon substrates to

profile soil microbial communities (MicroResp™). *Applied and Environmental Microbiology*, 69(6), 3593–3599.

<https://journals.asm.org/doi/10.1128/aem.69.6.3593-3599.2003>

Chapman, S. J., Campbell, C. D., & Artz, R. R. E. (2007). Assessing CLPPs using MicroResp™—A comparison with Biolog and multi-SIR. *Journal of Soils and Sediments*, 7(6), 406–410.

<https://link.springer.com/article/10.1065/jss2007.10.259>

Exemple de SQI - Obriot, F., Stengel, P., et al. (2016). Multi-criteria indices to evaluate the effects of repeated organic amendment applications on soil and crop quality. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 232, 66–77.

<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0167880916303991>

VESS - Guimarães, R. M. L., Neves Jr, A. F., Silva, W. G., Rogers, C. D., Ball, B. C., Montes, C. R., & Pereira, B. F. F. (2017). The merits of the Visual Evaluation of Soil Structure (VESS) for assessing soil physical quality in the remote, undeveloped regions of the Amazon basin. *Soil & Tillage Research*, 173, 75–82.

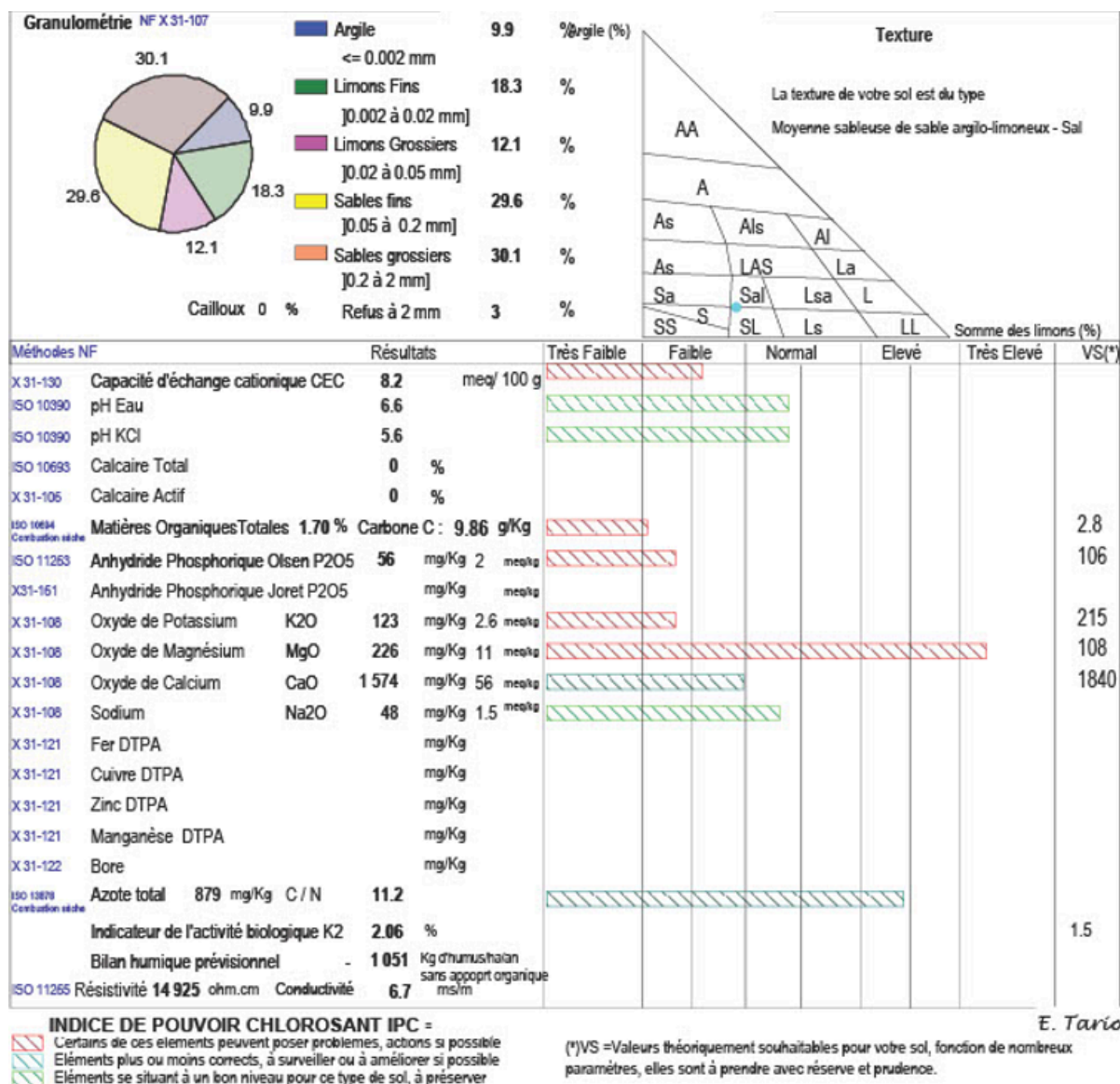
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0167198716302239?via%3Dihub>

Évolution des propriétés physiques d'un sol (compaction) - Keller, T., Sandin, M., Colombi, T., Horn, R., & Or, D. (2021). Soil structure recovery following compaction: Short-term evolution of soil physical properties in a loamy soil. *Soil Science Society of America Journal*, 85, 1708–1724.

<https://acsess.onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/saj2.20240>

b) Annexe

- Annexe 1 : analyses pédologiques préliminaires



LABORATOIRE D'ANALYSES AGRICOLES TEYSSIER | ROUTE DES JUNCHAS 26460 BOURDEAUX | TEL. 04 75 53 31 43
 info@laboratoire-teyssier.com | www.laboratoire-teyssier.com

Rapports entre cations :

K/Mg : 0.2 faible

Ca/Mg : 5 Satisfaisant

granulometrie 8 fractions

%	argile	limons fins	limons grossiers	sables >50 µ	>150 µ	>250 µ	>500µ	>1000 µ
2503382	9.9	18.3	12.1	21.6	8	12.3	9.3	8.5

- Annexe 2 : Photo parcelle entière - avant 3ième faux semis (03/07/2025)



A gauche la parcelle TM, à droite la parcelle TA. On peut également voir les asperseurs qui servent à l'arrosage ainsi que les balises indiquant les points de prélèvement.

- Annexe 3 : Photo parcelle TA - début de culture post-plantation (08/08/2025)



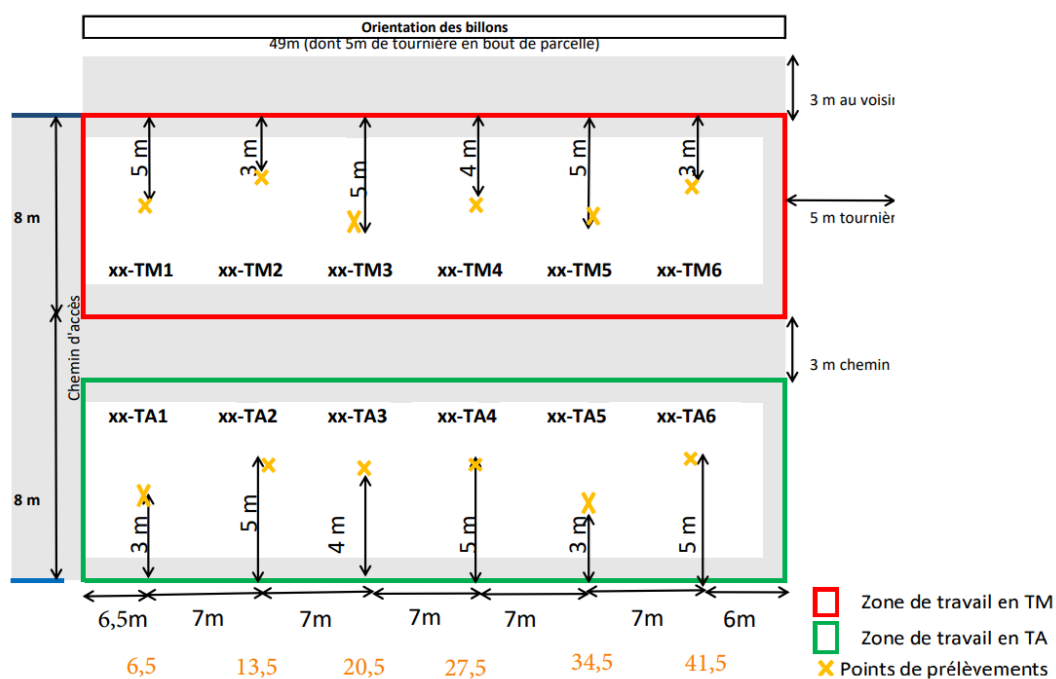
Les oignons ont été plantés au fond des sillons, après fertilisation. Lors du premier buttage, la terre entre les sillons sera rabattu sur les oignons pour commencer à former les buttes. On peut également voir la barrière électrique mise en place pour lutter contre les sangliers.

- Annexe 4 : ITK prévisionnel

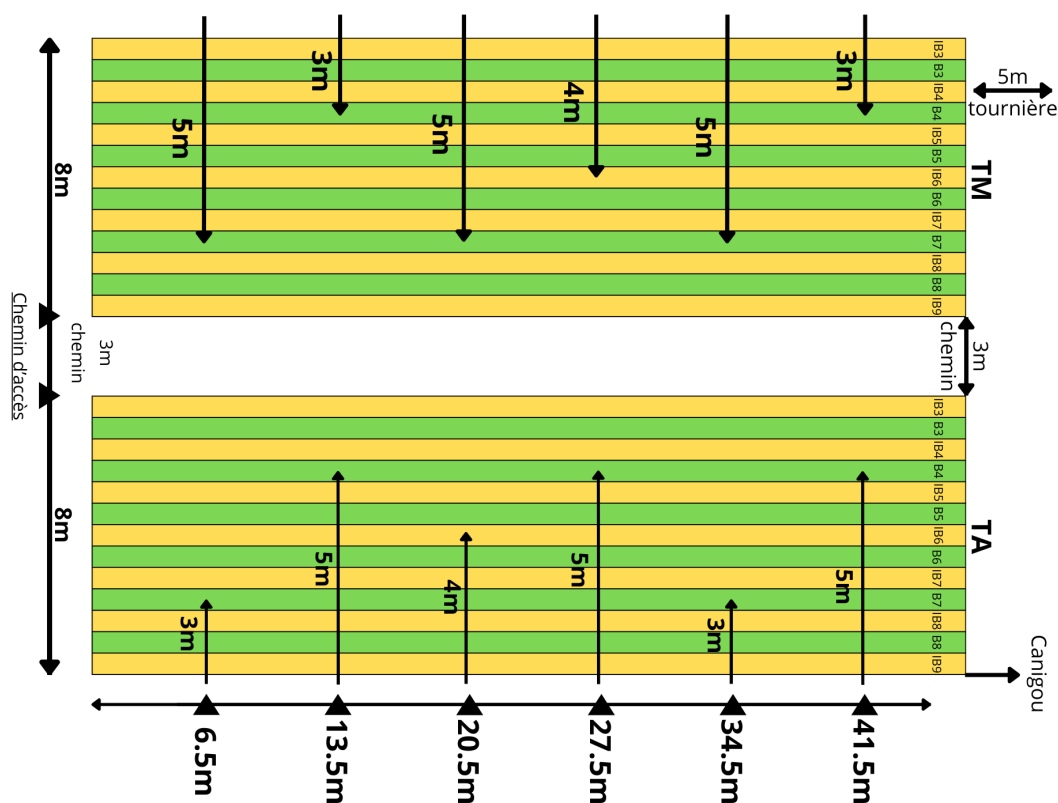
Présentation des 2 ITK à l'issue des 2 ateliers TA et TM séparés

Outils	Broyeur à marteau enchaîné avec passage de Canadien (Chisel) + 2-3 semaines : 2 à 3 passages de Vibro à 3-4 semaines d'intervalle	Sous-solense	2	Rotobèche	Ouverture des sillons à la sillonseuse la veille de : Plantation manuelle (sans entour)	Butteuse	Butteuse	Butteuse	Récolte manuelle + manitou		
						Complément possible avec des passages de « peignes de binage »					
						Possibilité de ne faire que 2 buttages					
Période	2 ^{ème} 15aine de mars à av.	2 ^{ème} 15aine avril	Date optimale en sol frais non détrempé. Possible en sec	Fin juillet	1 ^{ère} 15aine d'août	Mi ou fin sept	Mi-octobre	Mi-novembre (15) avant récolte)	Déc. Jan. Fév.		
Objectifs et conditions d'interv.	Déchaumage En conditions sèches pour éviter le développement des adventices	Infiltrer l'eau. La passer en conditions sèches .	Selon le choix de la fertilisation. Délais d'antipication +/- important. Si tumer bien composé = enfouissent direct.	Profondeur de travail 25-30cm.	Espacement à 75cm réalisé par tracteur	Placer la ligne d'asperion entre 2 sillons au centre de la parcelle. S'organiser pour éviter d'avoir à la retirer avant récolte.	Buttage de suivi de croissance plante. + contrôle des adventices avec les critères suivants (p/r adv.) éviter concurrence racinaire et solaire + stade adv. optimal p/r effet outil		Moins d'enleu sur l'herbe. Besoin de bien monter les buttes.	Taille suffisante des calets Passage du manitou sur zone technique entre les parcelles.	
	Interventions culturales	Reprise du sol	Décompactation	Fertilisation	Enfouissement	Plantation (création des futures billons)	Installation irrigation	1 ^{er} buttage	2 ^{ème} buttage	3 ^{ème} Buttage de blanchiment	Récolte
« déchaumer » « retourner »											
« récolter les calets »											
Interventions culturales	Reprise du sol par labour	Faux semis (à si on peut)	Arrosage si nécessaire avant l'occultation	Occupation	Occupation	Plantation	Buttage 1	Binage / buttage 2	Binage / buttage 3	Binage / buttage 4	
objectifs et conditions d'interv.	Neutraliser la végétation présente et stock graine. Sol ressuyé. Avoir 1 sem. entre broyage et labour. 3 sem. d'intervalle entre opération Travail « en ½ herse » = recouvrement.	1 mois après labour Pouvoir irriguer entre 2 griffages s'il n'y a pas de pluie. 3 sem. d'intervalle entre opération	Prévoir une bonne fixation (passage au tracteur hors des parcelles expel).	Trouver une kassine (D.M. ? ☺) Réussir à tracer droit les 2 x ½ butes (création de levres) au centre on plante. Planter droit pour faciliter futures opérations. Irrigation préalable si nécessaire.	Stabiliser le bulbe et calmer l'herbe. Assouplissement du passe pied pour faciliter la remontée de terre lors de buttages Calmer les adventices	Ajustement des outils en fonction de l'évolution pour créer du sol / adventices blanc.	Nécessité d'un gros buttage pour créer du blanc.	Passage 1 fois par semaine pour récupérer les bous calibres.			
Période	Début février	Mars à début mai		Mai à...	... juillet	1 ^{ère} 15aine d'août	Sept	Déb oct	Fin oct.	Déb. Nov.	Déc. Jan. Fév.
Outils	Tondobroyeur sur chenilles 80cm large (broyeur à fléaux). Dent sous-solense. Brabant de 12 poutres (à 15cm de d'hirondelle en alternance)	Canadienne « luge » de 9-11 dents Suivi de plusieurs passages de Herse (montée avec côtes de melon pour les premiers puis des queues d'hirondelle en alternance)	Sous-solage ?	Bâche d'occultation	Kassine avec disques billonneur, éventuellement ajouter dent de vibro (ou une autre réglable en hauteur) à l'arrière des disques. Plantation manuelle avec un léger appli.	Kassine avec disques billonneurs	Houe maraichère avec 3 côtes de melons à l'avant et 2 versoirs à l'arrière.	Houe ou kassine en ajustant les outils en fonction de l'observation	Houe ou kassine av	Récolte manuelle + manitou	

- Annexe 5 : plan prélèvement sol nu



- Annexe 6 : plan prélèvement courant culture



Représenté ici uniquement les billons centraux : il y a 10 billons et 11 interbillons pour une largeur de 8m

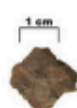
- Annexe 7 : Synthèse des indicateurs

Indicateur	Fonction	Fréquence	Lieu de la mesure	Mesure	Indicateur
POxC	Dynamique du carbone	Campagne	Avignon	Carbone Organique biodisponible	fertilité et taux de matière organique
MicroResp		Campagne	Avignon	quantité CO ₂ produit en fonction du substrat	activité microbienne et diversité communauté microbienne
Bait Lamina		Campagne	IS	vitesse de dégradation de la MO	activité biologique du sol
Slake Test	Structure du sol	Campagne	IS	% destruction du sol à chaque étape	stabilité des agrégats en milieu saturé en eau
BeerKan		Campagne	IS	temps d'infiltration de l'eau	potentiel d'infiltration / capacité au champs
VESS		Campagne	IS	caractéristique visuelles du sol	Structure du sol
Pénétromètre		travail du sol	IS	résistance à la pénétration	Compaction du sol
Humidité		travail du sol	Alénia	masse de sol humide / séché	taux d'humidité du sol
NitraChek	Cycle des nutriments	Campagne	IS	Taux de nitrates	nutriments du sol
Taux d'enherbement	Agronomique	travail du sol	IS	taux de recouvrement	Efficacité des techniques agronomiques
Relevé de pédofaune		Campagne	IS	nombre et biomasse de la pédofaune	Santé du sol
Rendement et qualité		Récolte	Alénia	Calibre, rapport déchet/commercialisable	performance agronomique
Suivi de travail du sol	Organisationnel	Travail du sol	IS	Commentaires lors de discussions	Complexité agronomique

- Annexe 8 : Slake Test - Seuil détérioration

	Score	Observation
A la pose:	0	Désagrégation 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 9 : Grille notation VESS



Rédacteur : N. Rakotonirafy / J. Félix-Faure Vérificateurs : A. Brauman / A. Thumazeau Evaluation Visuelle de la Structure (VESS) Typologie de la structure du sol Maintien de la structure Dernière mise à jour : le 11/2024					
Qualité de la structure	Taille et apparence des agrégats	Porosité visible et racines	Apparences après extraction :	Traits distinctifs	Apparence des agrégats ou fragments de ~1,5 cm de diamètre
Sq1 – Friable <i>Agrégats se désagrègent très facilement entre les doigts</i>	La plupart des agrégats < à 0,6 cm	Radines colonisent l'ensemble du bloc. Très poreux.		Agrégats fins et poreux	 Agrégats très poreux composés de plus petits maintenus ensemble par les racines. Ils sont pour la plupart directement obtenus lors de l'extraction du bloc.
Sq2 – Intact <i>Agrégats se désagrègent facilement entre les doigts</i>	Mélange d'agrégats arrondis de 2mm à 7mm	Radines colonisent l'ensemble du bloc. La plupart des agrégats sont poreux.		Fortes porosités des agrégats	 Agrégats arrondis, fragiles et poreux, qui se cassent facilement.
Sq3 – Ferme <i>La plupart des agrégats se désagrègent facilement entre les doigts</i>	Mélange d'agrégats de 2mm-10mm. Moins de 30% <1cm. Présence possible de mottes fermées.	Porosité et racines au sein des agrégats. Présence de pores grossiers visibles et de fentes de retrait.		Faible porosité des agrégats	 Agrégats avec peu de pores visibles et plutôt arrondis.
Sq4 – Compact <i>Assez difficile de briser les mottes fermées avec une seule main</i>	Principalement mottes fermées subangulaires >10 cm. Moins de 30% <7cm. Structure lamellaire possible.	Radines concentrées autour des mottes fermées. Peu de « pores grossiers » visibles » et peu de fissures.		Racines dans les pores grossiers visibles	 Ces fragments de forme cubique à bords anguleux et fissures internes sont faciles à obtenir sur sol humide.
Sq5 – Très compact <i>Très difficile de briser les mottes fermées avec les mains</i>	Mottes angulaires >10cm, très peu de taille <7cm	Pas ou peu de racines. Très peu de « pores grossiers » et de fissures. Anoxie possible.		Couleur gris bleu possible	 Le sol peut être fragmenté quand le sol est humide, mais peut exiger un effort important. Habituellement pas de pores ou fissures visibles à l'œil.



- Annexe 10 : Classification Dominance-Abondance selon Braun-Blanquet

L'abondance-dominance selon Braun-Blanquet :

Coefficients	Echelle de recouvrement (%)	Recouvrement moyen (%)
5	Recouvrement supérieur à 75% de la surface de référence	87.5
4	Recouvrement de 50 - 75% de la surface de référence	62.5
3	Recouvrement de 25 - 50% de la surface de référence	37.5
2	Recouvrement de 5 - 25% de la surface de référence	15
1	Recouvrement inférieur à 5%	2.5
+	Peu d'individus, très faible recouvrement	0.1
r	Rare	-

- Annexe 11 : Fiche terrain suivi travail du sol

Travail sol TA

Date : 06/04		Heure de début : 6h52	parlotte : 10'	Heure de fin : 8h35						
Outils : houe manœuvrière (4 petites ailettes @ 1 large arrière)										
Poids : ≈ 20 kg		Cheval : Douce								
Profondeur : 10-12 cm		Compteur Eau : 92, 0403 m ³								
Nombres de passages : ☒ ☒ ☒ ☒ : 14 aller-retour = 34 passages.										
Dessin des passages sur la parcelle (TA)		Commentaires :								
Sud-Ouest Route début		* début bord droit, retour contre puis décalé : chevauchement $\approx \frac{1}{4}$ sur la trace précédente. ↳ Problème partie droite : "pifu" du cheval de plier les chemopodes haut domo @ de passage bord droit. * Arrosoage la veille (oubli 03/04) ↳ peut détruire grosses motes. (arrosoage 10mm 01/04, 10mm 02/04) * Quelques chemopodes arrachés à la main * Déplacement des résidus chemopodes hors du champs (Laurent désemcombra la houe en bout de champ)								
Végétation :		<table border="0"> <tr> <td>Chemopodes 40%</td> <td>Pouppier 5%</td> </tr> <tr> <td>Diplostaxe 10%</td> <td>Autre 5%</td> </tr> <tr> <td>Liseron 10%</td> <td>Sol nu 30%</td> </tr> </table>			Chemopodes 40%	Pouppier 5%	Diplostaxe 10%	Autre 5%	Liseron 10%	Sol nu 30%
Chemopodes 40%	Pouppier 5%									
Diplostaxe 10%	Autre 5%									
Liseron 10%	Sol nu 30%									
note : Diplostaxe Fausse roquette (Brassicacées)										
Couverture TM :										
TA : $\ominus$ homogène : chemopode taille moyenne @ sem path										
Résidus TM : classés @, dense @										
TA : homogènes (bcp de chemopodes sortis de la parcelle) ↳ reste qd chemopode et un peu de pourpier (rare)										
Commentaire global : Affinage du sol, avec un reste de motte trop sèches.										

- Annexe 12 : Exemple de fichier excel standardisé

Projet PETTA Test Penétro																								
Lieu mesure																								
Date mesure																								
N Campagne																								
Nb échantillons	12																							
			Profondeur																					
Moda.	Points	R / P / ND	Nom échantillon	Number	0	-2,5	-5	-7,5	-10	-12,5	-15	-17,5	-20	-22,5	-25	-27,5	-30	-32,5	-35	-37,5	-40	-42,5	-45	Commentaires
TA	1	ND	--TA1 - ND																					
TA	2	ND	--TA2 - ND																					
TA	3	ND	--TA3 - ND																					
TA	4	ND	--TA4 - ND																					
TA	5	ND	--TA5 - ND																					
TA	6	ND	--TA6 - ND																					
TM	1	ND	--TM1 - ND																					
TM	2	ND	--TM2 - ND																					
TM	3	ND	--TM3 - ND																					
TM	4	ND	--TM4 - ND																					
TM	5	ND	--TM5 - ND																					
TM	6	ND	--TM6 - ND																					
Moyenne TA				#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!
Moyenne TM				#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!
Données > Convertir > Délimite - Virgule -																								

Penetro TA

Penetro TM

Moyennes TA et TM

- Annexe 13 : equation agrégation SHI

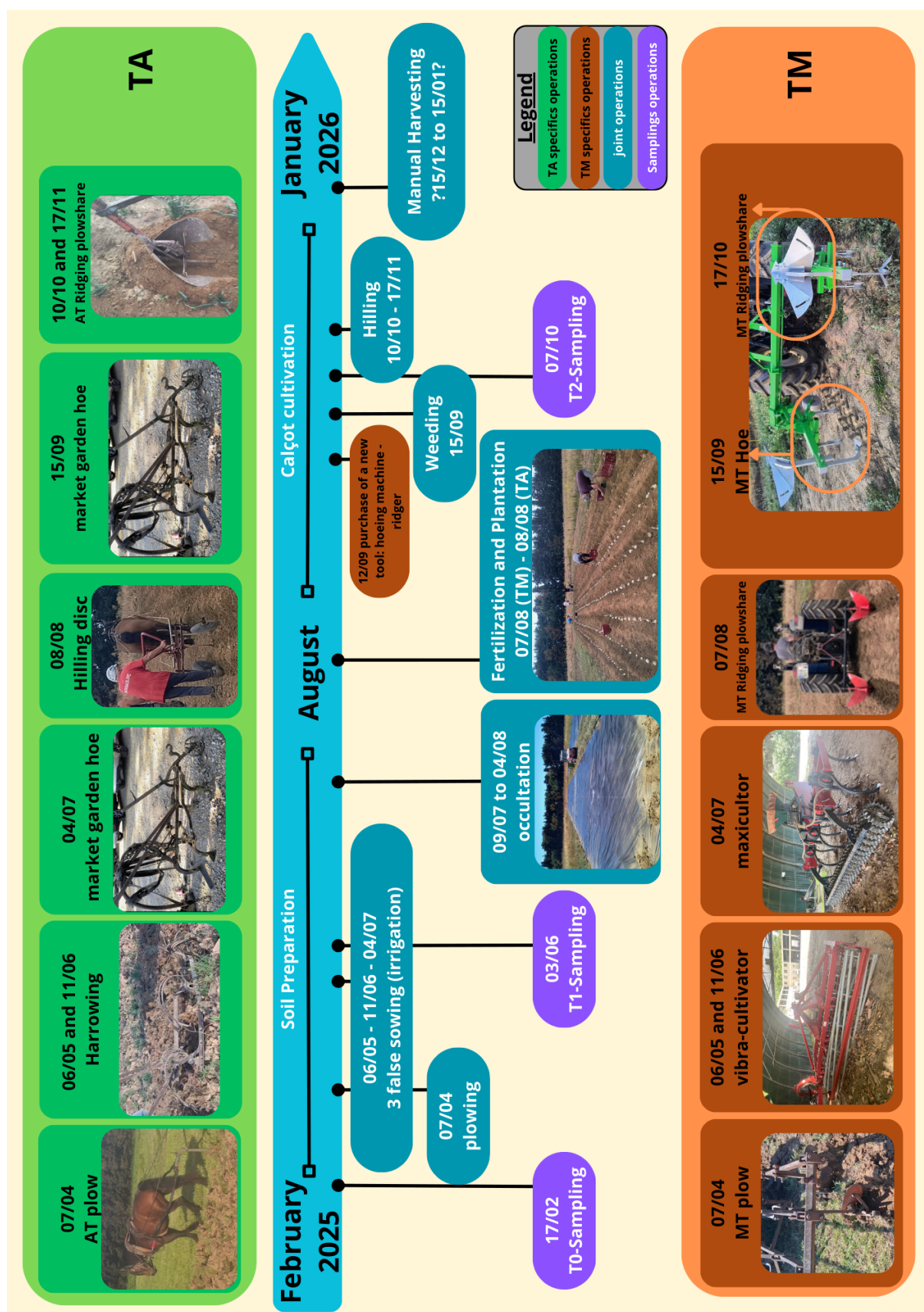
Equation agrégation SHI : $SHI = \sum_{i=1}^n w_i * S_i$ avec

- SHI : Soil Health Index
- w_i : poids affecté à l'indicateur i
- S_i : Valeur normalisée de l'indicateur i

- Annexe 14 : Formule empirique de normalisation des données pénétrométriques par l'humidité

Equation normalisation pénétrométrie : $Q_{normalisée} = Q_{mesurée} \times \left(\frac{\theta_{ref}}{\theta_{mesurée}}\right)^b$ avec :

- $Q_{normalisée}$: La résistance normalisée au taux d'humidité de référence
- $Q_{mesurée}$: La résistance mesurée
- $\theta_{mesurée}$: Le taux d'humidité mesurée
- θ_{ref} : Le taux d'humidité de référence choisi
- b : Le coefficient dépendant de la texture du sol



- Annexe 16 : Graphique de la pluviométrie et de l'irrigation sur la période de culture

