



**HAL**  
open science

# Application et évaluation de “ Biofunctool ”, un indice de qualité des sols, sur des systèmes agroécologiques viticoles Méditerranéens du Projet Salsa

Eliau Escande

## ► To cite this version:

Eliau Escande. Application et évaluation de “ Biofunctool ”, un indice de qualité des sols, sur des systèmes agroécologiques viticoles Méditerranéens du Projet Salsa. Science des sols. 2021. hal-04475795

**HAL Id: hal-04475795**

**<https://hal.inrae.fr/hal-04475795v1>**

Submitted on 23 Feb 2024

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

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



Distributed under a Creative Commons Attribution - NonCommercial 4.0 International License



**Master SEME « Sol Eau Milieux Environnement »**  
**Mémoire de stage**

2021

**Application et évaluation de  
« Biofunctool », un indice de qualité  
des sols, sur des systèmes  
agroécologiques viticoles  
Méditerranéens du Projet Salsa.**

**Analyse des résultats « Biofunctool » en fonction  
des systèmes viticoles (agroécologiques versus  
conventionnels).**

Maître de stage : **METRAL Raphaël**

**ESCANDE Elian**

Tuteur pédagogique : **LÉVÈQUE Jean**

**Promotion 2020-2021**

## Sommaire

<b>Figures</b> .....	4
<b>Tableaux</b> .....	4
<b>Cartes</b> .....	5
<b>Photos</b> .....	5
<b>Annexes</b> .....	6
<b>Remerciements</b> .....	7
<b>Présentations des organismes d'accueil</b> .....	8
a) INRAE .....	8
b) UMR ABSys .....	8
c) UMR Eco&Sol .....	9
d) Domaine du Chapitre de Villeneuve-Lès-Maguelone .....	9
<b>Mes missions</b> .....	10
<b>Introduction</b> .....	11
<b>Matériel(s) et Méthode(s)</b> .....	13
I) Zone d'étude et caractéristiques environnementales .....	13
a) Le projet SALSA .....	13
b) Localisation du dispositif expérimental viticole agroécologiques .....	14
c) Paysage géologique de la zone d'étude .....	16
d) Paysage pédologique de la zone d'étude .....	17
e) Description de la texture, profil altimétrique, de l'humidité relative et de la résistivité du sol du dispositif expérimental .....	18
II) Dispositif expérimental et systèmes agroécologiques ou conventionnels .....	20
a) Organisation spatiale du dispositif SALSA de Montpellier .....	20
.....	20
b) Système Divers Viti (Dvit) .....	22
c) Système All viti (Avit) .....	23
d) Système Témoin viti (Tvit) .....	23
III) Biofunctool .....	24
1) Dynamique du Carbone .....	25
a) Lamina Baits (Kratz., 1998) .....	25
b) POXC, Permanganate Oxidable Carbon (Culman et al., 2012) .....	26
c) SituResp, la respiration basale du sol (Thoumazeau et al., 2017). .....	28
2) Cycle des nutriments .....	30
a) AEMNO3, les membranes cationiques ou anioniques échangeuses d'ions (Cadre et al., 2018) .....	30

b)	NminSol, Extraction azote minéral (McTaggart et Smith., 1993).....	32
c)	Dosage par flux continue (Ruzicka et Hansen., 1988).....	32
3)	Maintien de la structure du sol .....	33
a)	VESS, évaluation visuelle de la structure du sol (Guimarães et al., 2011).....	33
b)	Beerkan, l'infiltration de l'eau dans le sol (Lassabatère et al., 2006).....	35
c)	Stabilité des agrégats (Herrick et al., 2001).....	36
IV)	Statistique(s) .....	37
a)	Test ACP.....	37
b)	Calcul des p-values pour chaque indicateur en fonction des systèmes.....	37
c)	P-values des indicateurs en fonction des blocs pour chaque système.....	37
d)	Régression linéaire et coefficient de corrélation.....	37
e)	Calcul des indices de qualité des sols. ....	37
	<b>Résultats</b> .....	38
1)	Dispersion statistique des variables et indicateurs « Biofunctool ». ....	38
2)	Différences en fonction des systèmes viticoles des indicateurs « Biofunctool ». ....	40
a)	SituResp .....	41
b)	POXC .....	41
c)	Lamina Baits .....	42
d)	Beerkan .....	42
e)	Stabilité des agrégats.....	42
f)	Extraction d'azote minérale au KCl .....	42
g)	Membrane anionique .....	42
3)	Modification du pH du sol en fonction des pratiques agricoles ? .....	43
4)	Suivi de l'évolution des stock azotés. Validation du protocole.....	45
5)	Score « Biofunctool » en fonction des systèmes viticoles.....	46
	<b>Discussions</b> .....	47
1)	Dispersion statistique des variables et indicateurs « Biofunctool ». ....	47
2)	Différences en fonction des systèmes viticoles des indicateurs « Biofunctool ». ....	49
a)	SituResp .....	49
b)	POXC .....	49
c)	Lamina Baits .....	50
d)	VESS.....	50
e)	Beerkan .....	51
f)	Stabilité des agrégats .....	51
g)	Extraction minérale de l'azote au KCl.....	52
h)	Membrane anionique .....	52
3)	Modification du pH du sol en fonction des pratiques agricoles ? .....	53

4) Suivi de l'évolution des stocks azotés. ....	54
5) Score « Biofunctool » en fonction des systèmes viticoles.....	55
<b>Conclusion / Perspective</b> .....	56
<b>Bibliographie</b> .....	58
<b>Annexes</b> .....	62

## Figures

Figure 1 : Texture du sol du dispositif expérimental Salsa. ....	18
Figure 2 : Profil altimétrique du dispositif expérimental Salsa. ....	19
Figure 3 : Schéma du dispositif expérimental avec les différents systèmes (différentes couleurs), les blocs (qui sont les répliques des systèmes) et les placettes (qui sont les points d'échantillonnages des mesures "Biofunctool"). ....	21
Figure 4 : Schéma du système Divers Viti (Dvit). ....	22
Figure 5 : Schéma du système All viti (Avit). ....	23
Figure 6 : Schéma du système Témoin viti (Tvit). ....	23
Figure 7 : Schéma d'une languette en PVC pour le test Lamina Baits de "Biofunctool". ....	25
Figure 8 : Courbe d'étalonnage du spectrophotomètre en fonction de concentration connue de KMNO <sub>4</sub> et de l'absorbance du spectre lumineux à une longueur d'onde de 550 nm). ....	27
Figure 9 : Illustration du processus de la membrane échangeuse d'anions chargée en NaHCO <sub>3</sub> . ....	30
Figure 10 : Droite de régression entre le temps d'infiltration (en sec) et le volume d'eau cumulé infiltré (mL). ....	35
Figure 11 : Analyse en composantes principales (ACP) des indicateurs "Biofunctool". Pour déterminer le nombre d'axes à prendre en compte, il a été choisi de ne retenir que les axes dont les valeurs propres sont supérieures à 1 (c'est le critère de Kaiser). ....	38
Figure 12 : Boxplots des 9 indicateurs « Biofunctool » en fonction des systèmes (en abscisse) et des blocs. La couleur rouge est attribuée pour le bloc 1, le bleu pour le bloc 2 et le vert pour le bloc 3. ....	40
Figure 13 : Régression linéaire entre les mesures de POXC et le pH du sol. Un tableau avec les coefficients de corrélation (Pearson) pour chaque système est associé. ....	43
Figure 14 : Évolution du stock d'azote minéral du sol de 2019 à 2020. ....	45
Figure 15 : Histogrammes des indices de qualités par groupes de variables et totaux en fonction des systèmes agronomiques. ....	46

## Tableaux

Tableau 1 : Présentation des indicateurs Biofunctool, des variables mesurées et des assemblages biologiques ciblés. ....	25
Tableau 2 : Tableau d'attribution des scores par trou d'une languette PVC (Lamina Baits) en fonction de l'état de dégradation du contenu cellulosé. ....	26
Tableau 3 : Attribution des scores pour le test VESS en fonction de différents critères (Qualité de la structure, taille des agrégats, porosité...). ....	34
Tableau 4 : Scores attribués aux agrégats en fonction du temps passé en immersion dans l'eau et du pourcentage de dégradation. ....	36
Tableau 5 : Tableau des moyennes et des écart-types pour chaque indicateur et en fonction des systèmes. La significativité des tests statistiques est annotée par des lettres. Des lettres identiques signifient l'absence de différence significative entre deux systèmes pour un indicateur. Des lettres différentes confirment la significativité du test statistique. ....	41

## Cartes

Carte 1 : Carte de France avec les différents sites qui accueillent le projet Salsa.....	13
Carte 2 : Localisation de Villeneuve-lès-Maguelone.....	14
Carte 3 : Image aérienne avec l'emplacement du dispositif expérimental Salsa de Montpellier sur Villeneuve-Lès-Maguelone. ....	15
Carte 4 : Paysage géologique autour du dispositif expérimental Salsa.....	16
Carte 5 : Paysage pédologique autour du dispositif expérimental Salsa.....	17
Carte 6 : Axe du profil altimétrique (figure 2) sur le dispositif expérimental Salsa. ....	18
Carte 7 : Interpolation de l'humidité relative de surface (0-20 cm) du dispositif expérimental Salsa. ....	19
Carte 8 : Résistivité du sol à 30 cm du dispositif expérimental Salsa.....	20
Carte 9 : Représentation cartographique des poids de bois de tailles par cep 2020 en fonction des systèmes et des blocs. ....	52

## Photos

Photo 1 : Photo aérienne réalisé par Clément Enard, technicien INRAE, du dispositif expérimental Salsa avec un rectangle de couleur pour chaque système. ....	20
Photo 2 : Les 8 languettes PVC après avoir incubées 10 jours dans le sol. Les états de dégradation est visible pour certain trou. ....	26
Photo 3 : Photo de la paillasse avec tous les échantillons de sol ayant réagis avec les solutions de KMNO4. À droite le spectrophotomètre en cours de mesure de l'absorbance d'un échantillon. ....	27
Photo 4 : Photo du matériel nécessaire pour mesurer la respiration basale du sol (SituResp). À droite, la cuvette est placée dans un contenant en plastique pour éviter le contact du gel et du sol. ....	28
Photo 5 : Différence colorimétrique du gel SituResp en fonction de la respiration basale du sol. L'intensité croissante d'émission de CO2 du sol se lie de gauche à droite (du violet vers le jaune). ....	29
Photo 6 : Membrane échangeuse d'anions juste avant l'enfouissement. Chaque membrane est nouée avec du fil en nylon pour la récupérer facilement à la fin de l'incubation dans le sol. ...	31
Photo 7 : Photo de la préparation des flacons et des échantillons de sol associés pour réaliser l'extraction avec le KCl.....	32
Photo 8 : Analyseur à flux continu Skalar.....	33
Photo 9 : Les différentes étape pour exhumer un carré de sol de 20 cm*20cm. ....	34
Photo 10 : Mesure de la capacité d'infiltration du sol (Beerkan). ....	35
Photo 11 : Mesure in-situ de la stabilité des agrégats. 18 agrégats sont chronométrés en même temps pour l'attribution de leurs scores. 6 agrégats sont évalués pour le score d'une placette. ....	36

## Annexes

Annexe 1 : Résultats des p-value des tests statistiques en fonction des blocs de chaque système pour tous les indicateurs. ....	62
Annexe 2 : Profil 1 de la fosse pédologique en Juin de la parcelle du dispositif. ....	63
Annexe 3 : Profil 2 de la fosse pédologique en Juin de la parcelle. ....	64
Annexe 4 : Profil 3 de la fosse pédologique en Juin de la parcelle. ....	64
Annexe 5 : Profil 4 de la fosse pédologique en Juin de la parcelle. ....	65
Annexe 6 : Tirage aléatoire pour l'ordre de passage des placettes pour BFT. ....	66



## Remerciements

Un grand merci à Raphaël METRAL, mon maître de stage, qui m'a reconduit et m'a fait confiance une deuxième fois pour réaliser ce stage. J'avais été très bien accueilli, accompagné et conseillé lors de mon premier stage et ce fut à nouveau le cas pour cette année.

Je remercie également les équipes techniques et notamment Bénédicte OHL, Yvan BOUISSON et Clément ENARDT pour l'aide qu'ils m'ont fait bénéficier sur le terrain, la mise à disposition de tout le matériel, l'accès aux infrastructures ainsi que de leurs expériences pour pouvoir réaliser mes protocoles dans les meilleures conditions.

Durant ce stage, j'étais en collaboration avec Lou TABARY, qui étudiait la diversité floristique et faunistique sur les mêmes systèmes agroécologiques où j'ai déployé « Biofunctool ». Je tiens à la remercier car elle a participé à plusieurs manipulations de « Biofunctool » et j'ai souvent pu compter sur sa présence.

De manière plus générale, merci à toute l'unité UMR ABSys, que ce soit l'équipe « Agroforesterie » ou « Vigne » mais aussi le secrétariat pour son soutien précieux pour tout le côté administratif qui a pu intervenir au cours de mon stage.

Ensuite je souhaite remercier Alexis THOUMAZEAU qui a toujours été en appui pour la compréhension et l'apprentissage des protocoles « Biofunctool ». Merci au Laboratoire Eco&Sol qui m'a donné accès à ses locaux pour pouvoir réaliser mes analyses et aussi pour m'avoir fourni le matériel nécessaire à l'application de « Biofunctool ».

Merci aussi à mon tuteur de stage, Monsieur Jean LEVEQUE, pour m'avoir guidé et dirigé pour l'analyse, l'interprétation et la réalisation de mon rapport et de mon stage.

## Présentations des organismes d'accueil

Au cours de ce stage et pour l'application de « Biofunctool », plusieurs organismes sont intervenus et m'ont ouvert leurs locaux et infrastructures, prêté le matériel nécessaire et apporté un appui technique pour le bon déroulement des protocoles tant sur le terrain qu'en laboratoire.

### **a) INRAE**

INRAE, l'institut national de recherche pour l'agriculture, l'alimentation et l'environnement est créé le 1er janvier 2020. Il est issu de la fusion entre l'Inra, Institut national de la recherche agronomique et l'Institut national de recherche en sciences et technologies pour l'environnement et l'agriculture (IRSTEA).

L'INRAE est un institut de recherche français qui a pour missions de réaliser, d'organiser et de coordonner, à son initiative ou à la demande de l'État, tous travaux de recherche scientifique et technologique dans les domaines de l'agriculture, de l'alimentation, de la forêt, de l'environnement, de l'eau, de la biodiversité, de la bioéconomie, de l'économie circulaire, de la gestion durable des territoires.

### **b) UMR ABSys**

Les travaux de recherche conduits par l'Unité Mixte de Recherche ABSys ont pour objectif d'améliorer la durabilité de l'agriculture en mobilisant la diversité végétale dans les agrosystèmes à base de plantes pérennes, dont l'agroforesterie et la viticulture. Ces recherches visent à accompagner la transition agroécologique dans divers environnements méditerranéens et tropicaux.

Les agrosystèmes structurés autour de plantes pérennes se placent le long d'un gradient d'intensification conventionnelle, c'est à dire qu'ils dépendent plus ou moins des intrants phytosanitaires et des fertilisations. Certains agrosystèmes sont à un niveau d'intensification conventionnelle élevé et l'enjeu est alors de réduire leur impact sur l'environnement. D'autres, au contraire, sont moins intensifs avec une biodiversité élevée et l'objectif est alors d'imaginer des voies d'intensification écologique permettant de dégager des revenus plus élevés tout en maintenant les services à la société fournis par ces systèmes.

Ces projets scientifiques, dirigés par l'UMR ABSys, sont menés sur différents sites :

- Dispositif en agroforesterie tempérée à Restinclières (noyers hybrides, céréales ou pommiers)
- Dispositif agroforesterie méditerranéenne (oliveraie agroforestière).
- Dispositif en viticulture à Villeneuve-Lès-Maguelone.
- Dispositif en Guyane (cacaoyer).
- Il existe d'autres dispositifs en partenariat avec d'autres organismes de recherche, des réseaux et des parcelles de producteurs.

### **c) UMR Eco&Sol**

Eco&Sols est une unité mixte de recherche de 70 permanents, associant INRAE, l'IRD, Institut Agro Montpellier SupAgro et le Cirad.

Les objets d'études principaux de cette UMR sont les agroécosystèmes à bas intrants composés de plantes pérennes et/ou annuelles sous climat tropical et méditerranéen.

Leurs axes de recherche cherchent donc à répondre à des enjeux comme la réponse des agroécosystèmes face aux changements globaux :

- Pression démographique, avec une intensification responsable.
- Changements climatiques, avec adaptation via une résilience accrue et contribution à la mitigation des émissions de gaz à effet de serre.
- Préservation de l'environnement avec une limitation des pertes d'éléments minéraux et une minimisation des intrants, tout en assurant la sécurité alimentaire.

Pour cela, l'objectif général des travaux de l'UMR est d'améliorer la compréhension du rôle des organismes du sol et des plantes, ainsi que des interactions entre eux et avec leur milieu, dans les cycles biogéochimiques au sein des sols et agroécosystèmes.

### **d) Domaine du Chapitre de Villeneuve-Lès-Maguelone**

En Languedoc, à 10 km au sud de Montpellier, le Domaine se situe au cœur du village de Villeneuve-lès-Maguelone. Entre la garrigue et la mer sont cultivés 35 ha de vignes, 5 ha d'oliviers et 55 ha de grande culture. Sur ce vignoble se côtoient les cépages traditionnels de la région (Grenache, Syrah, Mourvèdre) et des variétés plus récentes (Merlot, Petit-verdot, Viognier). La culture des cépages encore peu connus comme le Marselan, le Caladoc, l'Aranel et le Chasan, issus de sélections et croisements fait à l'INRAE, sont utilisés dans la fabrication du vin, que ce soit du vin rouge, rosé ou blanc mis en vente sur place au domaine.

L'exploitation comprend donc 5 ha d'oliviers, ce qui représente environ 6000 oliviers et qui permettent de produire des huiles « vierges extras » de différentes variétés : Picholine, Rougette, Cayon, Arboussane, Arbequine...

Le domaine agricole du Chapitre en association avec l'INRAE et SupAgro de Montpellier est une plateforme pédagogique et expérimentale spécialisée dans la filière viti-vinicole. Certaines parcelles sont donc dédiées à des activités de recherche qui s'appuient sur deux approches complémentaires de l'agriculture : l'agroécologie et l'agriculture numérique (projet Mas numérique).

## Mes missions

La mission principale du stage est la mise en place et l'étude de « Biofunctool » sur les systèmes agroécologiques viticoles basés sur une parcelle du domaine du chapitre à Villeneuve-Lès-Maguelone. Biofunctool est un indice de qualité développé par Alain Brauman et Alexis Thoumazeau qui s'appuie sur neuf indicateurs de terrain, rapides et de faibles coûts, permettant d'évaluer trois fonctions principales du sol : la dynamique du carbone, le cycle des nutriments et le maintien de la structure du sol.

Le projet SALSA, qui a pour objectif de concevoir et d'évaluer des systèmes de culture viticole présentant une rupture majeure d'usage produits phytosanitaires (80% à 100% de réduction d'IFT), est réalisé sur différents vignobles de France assez représentatifs du paysage viticole français.

- Un vignoble représentatif du vignoble Atlantique situé à Bordeaux.
- Un vignoble septentrional situé à Colmar.
- Un vignoble méditerranéen situé en périphérie de Montpellier.

Une base de données collective, nommé SilexVitiOeno, a été créée pour uniformiser les analyses, les protocoles et pouvoir facilement échanger des informations avec une charte et une syntaxe commune. Une de mes missions consistées à l'utilisation de cette base de données pour y intégrer par exemple les résultats « Biofunctool » ou pour extraire des données sur la demande de mon maître de stage ou pour présenter des résultats pour le comité Salsa aux participants du Projet.

Un travail de présentation orale et de communication a également été l'objet du stage, car comme cités précédemment avec le comité du projet Salsa, j'ai eu à présenter des résultats aux participants du projet sur les quantités d'azote selon les systèmes viticoles pour les trois sites et sur les 3 dernières années (de 2019 à 2021) par exemple. Une présentation des résultats « Biofunctool » a été réalisée lors du séminaire de l'équipe « Vigne » de l'UMR ABSys.

Toujours sur le même dispositif, la participation aux itinéraires techniques et aux tâches agricoles pour entretenir les cultures faisait partie de mes missions. Je fais référence notamment à l'installation des micro-asperseurs sur le réseau d'irrigation, à la destruction des couverts à l'interface du paillage en géotextile et de l'inter-rang avec le rototable (difficile à détruire avec la tondeuse du tracteur sans détériorer le paillage), des mesures de potentiel hydrique sur le dispositif du Rieutort, mesure d'apex pour estimer la contrainte hydrique et la croissance végétative, rabattage des pieds de vigne gelées ou manquant de vigueur, ébourgeonnage, égrappage...

Lou TABARY qui était aussi stagiaire de Raphaël METRAL et qui étudiait la diversité faunistique et floristique selon les différents systèmes viticoles a eu besoin d'aide pour mettre en place les sessions de piégeage et de capture ainsi que pour les identifications floristiques. Mon rôle, quand je n'étais pas occupé avec « Biofunctool » était également de l'épauler sur ses activités.

## Introduction

La France est au premier rang européen par la surface agricole utile en 2013 (FAO) et elle compte 28,98 millions d'hectares, devant l'Espagne (23,65 millions d'hectares) et l'Allemagne (16,70 millions d'hectares). Concernant les quantités de substances actives vendues, la France est au deuxième rang européen avec 66 659 tonnes, après l'Espagne (69 587 tonnes) et devant l'Italie (49 011 tonnes). En termes d'utilisation, la France est au 9ème rang européen selon le nombre de kilogrammes de substances actives vendues rapporté à l'hectare, avec 2,3 kg/ha.

Le projet DEPHY EXPE SALSA, financé par le plan Ecophyto II+, a pour objectif de développer une agriculture durable en explorant des systèmes culturaux innovants favorables à une agriculture durable et respectueuse de l'environnement. Le projet DEPHY EXPE SALSA, dont l'un des trois dispositifs est situé au Domaine du Chapitre à Villeuneuve-Lès-Maguelone, propose de concevoir et d'expérimenter des systèmes de culture viticole agroécologique présentant une rupture d'usage des produits phytosanitaires (de 80% à 100% de réduction d'IFT) (Thiollet-Scholtus., 2021). Ce projet s'appuie sur la résistance variétale, les régulations biologiques naturelles ainsi qu'une gestion de la qualité du sol sans herbicide et l'usage en dernier recours de traitements de biocontrôle et/ou autorisés en agriculture biologique (Compant et Mathieu., 2016; Tamang et al., 2017). Ces stratégies sont complétées par des leviers d'efficience tels que l'utilisation d'outil d'aide à la décision, la maîtrise de la pulvérisation et l'observation des parcelles. Les différentes approches d'utilisation de ces leviers ont été travaillées dans le cadre des projets précédents DEPHY EXPE EcoViti Arc Méditerranéen (Métral et al., 2018).

En effet, les produits phytosanitaires sont fréquemment utilisés dans les systèmes de culture traditionnel dans le but de protéger les cultures des maladies, des parasites, des faunes ravageuses et de lutter contre la prolifération des plantes adventices en compétition avec nos cultures. Ces produits phytosanitaires qui s'avèrent toxiques pour les organismes cibles, peuvent aussi l'être pour l'environnement et pour la santé humaine (Agbohessi, Toko, et Kestemont., 2012; Multigner., 2005; TASEI., 1996). Malgré les règles d'utilisation et d'homologation des produits phytosanitaires appliqués sur nos cultures, certaines molécules peuvent se retrouver directement en contact avec les productions et de ce fait, se retrouver dans l'alimentation des populations à très faible dose (Bertrand et Duhem., 2004). Concernant l'environnement, outre l'application direct des produits, c'est surtout le transport de ceux-ci qui pose un problème. En effet, après l'application de ces produits, l'eau, le vent ou même la faune (écotoxicologie) disséminent ces agents chimiques et vont s'accumuler dans nos ressources en eau, nos sols et dans les écosystèmes (Flury., 1996). La limitation et la réglementation pour l'utilisation et le dosage de ces produits sont déjà en vigueur mais les terres agricoles représentent des surfaces importantes et c'est donc l'accumulation et la difficulté, pour certaines molécules, que l'environnement pourra dégrader qui expliquent parfois des concentrations importantes dans nos ressources (Schiavon et al., 1995), pouvant présenter un danger pour la santé humaine et l'environnement. De plus, de ces molécules contenues dans les produits phytosanitaires vont aux cours de leurs transports être soumises à des processus naturels de transformation environnementaux ou biologiques (UV, chimie du sol, chimie de l'eau, °C du milieu ...) qui rend difficile leurs analyses et leurs suivis (Belfroid et al., 1998).

Dans cette étude, nous mettons en place « Biofunctool », qui est un indice de qualité et de santé des sols (Thoumazeau et al., 2019) et comparons les résultats selon différents systèmes viticoles (agroécologique, associé ou non avec de l'agroforesterie, et conventionnel).

L'évaluation de la santé des sols devient un enjeu sociétal important, notamment dans le cadre de la transition agroécologique. Cependant, la notion de santé des sols et les moyens pour la mesurer ne font pas consensus au sein de la communauté scientifique. La définition la plus partagée est celle basée sur sa capacité à fonctionner (Karlen et al., 1997) et à fournir des services écosystémiques. Pourtant, les méthodes actuelles sont basées principalement sur des indicateurs de stocks (C, N, biomasse microbienne etc.) et n'intègrent pas, ou très peu, d'indicateurs fonctionnels basés sur le rôle des organismes du sol. « Biofunctool » est une nouvelle méthode d'évaluation fonctionnelle de la santé des sols développée et testée par Alain Brauman et Alexis Thoumazeau. Cette méthode intitulée « Biofunctool » intègre neuf indicateurs de terrain, rapides et de faibles coûts, permettant d'évaluer trois fonctions principales du sol : la dynamique du carbone, le cycle des nutriments et le maintien de la structure du sol.

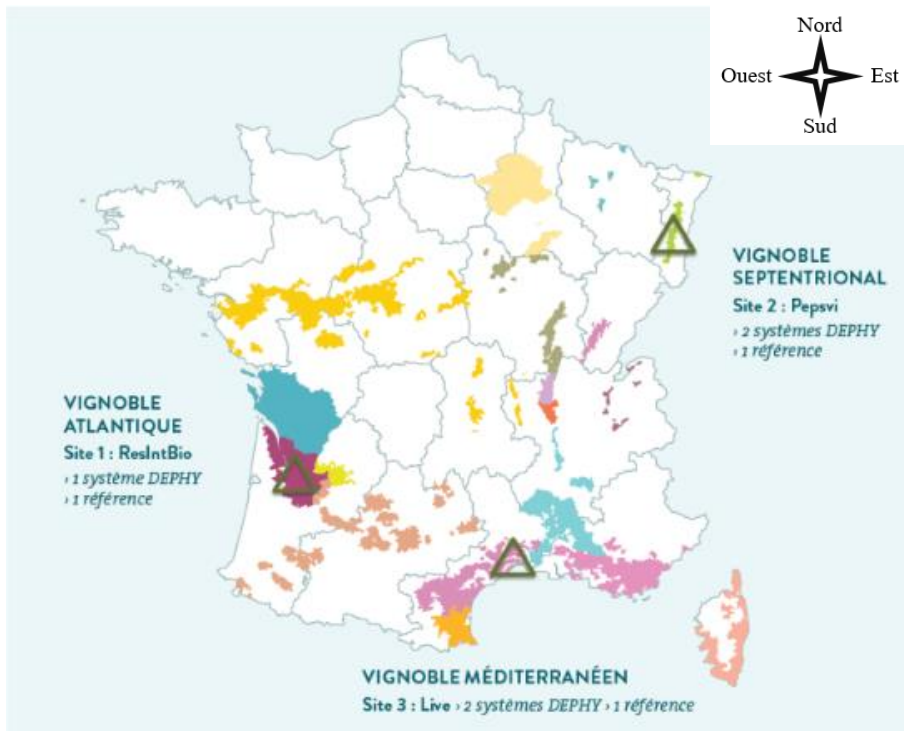
Avec « Biofunctool », nous tenterons de mettre en évidence l'impact, ou non, des pratiques culturales conventionnelles en viticulture sur la qualité et la santé des sols vis-à-vis de systèmes plus respectueux de l'environnement et n'ayant pas recours à des intrants phytosanitaires, sans travail du sol et en y implantant des couverts végétaux.

Le projet Salsa par la proposition de ces systèmes de culture innovant ainsi qu'une référence témoin s'inscrit donc parfaitement dans une problématique visant à étudier l'impact de ses pratiques agricoles sur les sols et « Biofunctool » pourrait évaluer via ses indices de qualités du sol ces impacts.

## Matériel(s) et Méthode(s)

### I) Zone d'étude et caractéristiques environnementales

#### a) Le projet SALSA



Carte 1 : Carte de France avec les différents sites qui accueillent le projet Salsa.

Le projet SALSA « Systèmes viticoles agroécologiques mobilisant la résistance variétale et les régulations naturelles » s'appuie sur un réseau de trois dispositifs implantés dans des domaines expérimentaux du Bordelais, de l'Alsace et du Languedoc (Carte 1). Ces trois sites sont caractérisés par des contextes agro-climatiques (atlantique, continental, méditerranéen), des pressions parasitaires et des situations de productions contrastées.

Le projet Salsa se propose d'explorer des nouveaux leviers pour une rupture majeure dans les usages. Il s'inscrit dans le plan Ecophyto de réduction des usages de produits phytopharmaceutiques. Il est financé par le dispositif DEPHY EXPE de l'OFB.

Les leviers mobilisés habituellement pour la lutte contre les maladies et ravageurs sont principalement des leviers d'efficacité de la lutte chimique (outils d'aide à la décision, maîtrise de la pulvérisation, observations des parcelles) complétés par des leviers de substitution.

Le projet Salsa a pour objectif d'explorer des combinaisons de leviers peu travaillées, ou simplement initiées dans quelques projets. Il se propose de concevoir et expérimenter des systèmes de culture viticole agroécologique présentant une rupture majeure d'usage des produits phytosanitaires (80% à 100% de réduction d'IFT). Ces systèmes mobiliseront la résistance variétale, les régulations naturelles, une gestion de la qualité du sol sans herbicide, avec un minimum de travail du sol et des traitements en dernier recours. Un réseau de trois dispositifs expérimentaux permettra l'évaluation de ces systèmes dans trois grands bassins représentatifs du vignoble français.

L'évaluation des performances pour les trois sites nécessite des protocoles communs et viseront à étudier :

- Les pratiques culturales (type d'opération, matériel utilisé, date, durée, intrants, doses, IFT, charges opérationnelles, de main d'œuvre et de mécanisation, temps de travaux).
- L'évolution de la qualité des sols (critères chimiques, physiques et biologiques, nématofaune, biomasse microbienne, qualité de la matière organique, dynamique de l'eau et des nutriments).
- Des couverts végétaux (taux de couvertures végétales, richesses spécifiques, hauteurs, nombre d'espèces fleuries et biomasse produite).
- Le suivi des auxiliaires et de la diversité faunistique (prédateurs présents dans la canopée [araignées, opilions], au sol [carabes, araignées, opilions], pollinisateurs [abeilles, bourdons, syrphes]).
- Dynamique des bio-agresseurs de la vigne sur les feuilles et les grappes.
- Santé de la vigne et productivité (la vigueur, rendements et composantes du rendement, micro-vinifications)

La mise en place, le suivi et l'analyse des systèmes dans leurs ensembles permettra de répondre aux questions suivantes :

- Quelle réduction d'intrants en combinant résistance variétale aux maladies et infrastructures agroécologiques ?
- Pour quelles performances (quantité et qualité de production) ?
- Quel impact sur biodiversité régulation des ravageurs ?
- Pérennité des systèmes maximisant le recours aux couverts végétaux et limitant le travail du sol ?

## b) Localisation du dispositif expérimental viticole agroécologiques



Carte 2 : Localisation de Villeneuve-lès-Maguelone.

Villeneuve-lès-Maguelone est une commune française située dans le département de l'Hérault, en périphérie de Montpellier, en région Occitanie (Carte 2). Villeneuve-Lès-Maguelone est aux portes de Montpellier et est baignée par la mer Méditerranée.



Le sud-est du territoire est constitué d'étangs et lagunes dont la surface est partagée avec Palavas-les-Flots (étangs de l'Arnel et du Prévost) et Vic-la-Gardirole (étangs des Moures et de Pierre Blanche). Ces étangs sont coupés en deux par le canal du Rhône à Sète. Au sud de celui-ci, se trouve un cordon dunaire long d'environ neuf kilomètres. Au sud-ouest de la ville, à proximité de l'étang de Vic, une zone humide a permis l'activité saline.

La commune inclut dix zones naturelles d'intérêt écologique, faunistique et floristique (ZNIEFF), une zone de protection spéciale (ZPS) dans le cadre de la directive Oiseaux et un site d'intérêt communautaire (SIC) dans le cadre de la directive Habitat parmi les protections de la convention Natura 2000, ainsi que plusieurs terrains sujets à des protections particulières. L'occupation des sols de la commune, telle qu'elle ressort de la base de données européenne d'occupation biophysique des sols Corine Land Cover (CLC), est marquée par l'importance des territoires agricoles (33,1 % en 2018), une proportion sensiblement équivalente à celle de 1990 (33,9 %). La répartition détaillée en 2018 est la suivante : eaux maritimes (29,6 %), zones agricoles hétérogènes (22,2 %), milieux à végétation arbustive et/ou herbacée (10,6 %), zones humides côtières (9 %), zones urbanisées (8,5 %), terres arables (5,8 %), cultures permanentes (4,2 %), espaces ouverts, sans ou avec peu de végétation (2,7 %), zones humides intérieures (2,6 %), mines, décharges et chantiers (2,5 %), zones industrielles ou commerciales et réseaux de communication (1,5 %), prairies (0,9 %).



Carte 3 : Image aérienne avec l'emplacement du dispositif expérimental Salsa de Montpellier sur Villeneuve-Lès-Maguelone.

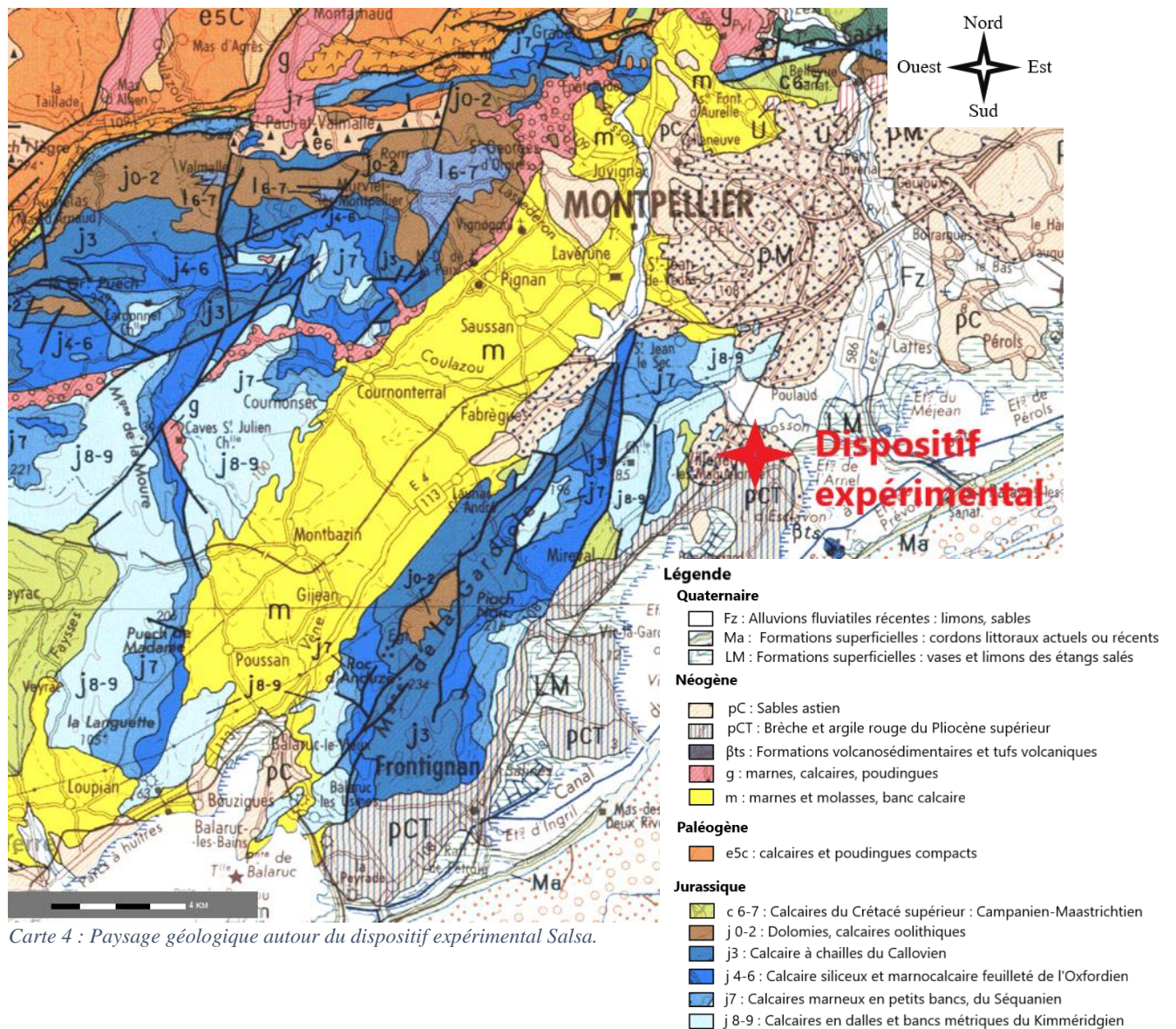
Les recherches, pour le projet SALSA, sont menées sur un îlot culturel appartenant au Domaine du Chapitre à Villeneuve-Lès-Maguelone (Carte 3) aux coordonnées latitude 43.52952 et longitude 3.86177 à 13 km au Sud de Montpellier où se trouve le campus de SupAgro.

Le dispositif de 2.2 ha est implanté sur l'îlot de l'Arnel comprenant 12 hectares au total, à proximité du Domaine. L'enjeu de l'implantation d'une parcelle agroécologique est d'autant plus en adéquation avec la situation géographique de la parcelle, puisqu'elle se trouve à proximité des étangs et donc des cours d'eau, mais elle est également voisine du collège des

Salins du village et des habitations de périphérie. Ainsi ce projet permettra d'envisager des solutions pour la conduite d'un vignoble à proximité de la zone urbaine sans impacter la vie des habitants.

Le climat est de type méditerranéen, c'est-à-dire avec des hivers doux, ce qui explique une température moyenne annuelle de 13,7°C, des étés chauds et secs avec quelques précipitations (environ 745 mm d'après climate-data.org) à l'automne et au printemps. Une station météo installée sur le domaine permet de suivre les variations climatiques au cours des expérimentations

### c) Paysage géologique de la zone d'étude



Carte 4 : Paysage géologique autour du dispositif expérimental Salsa.

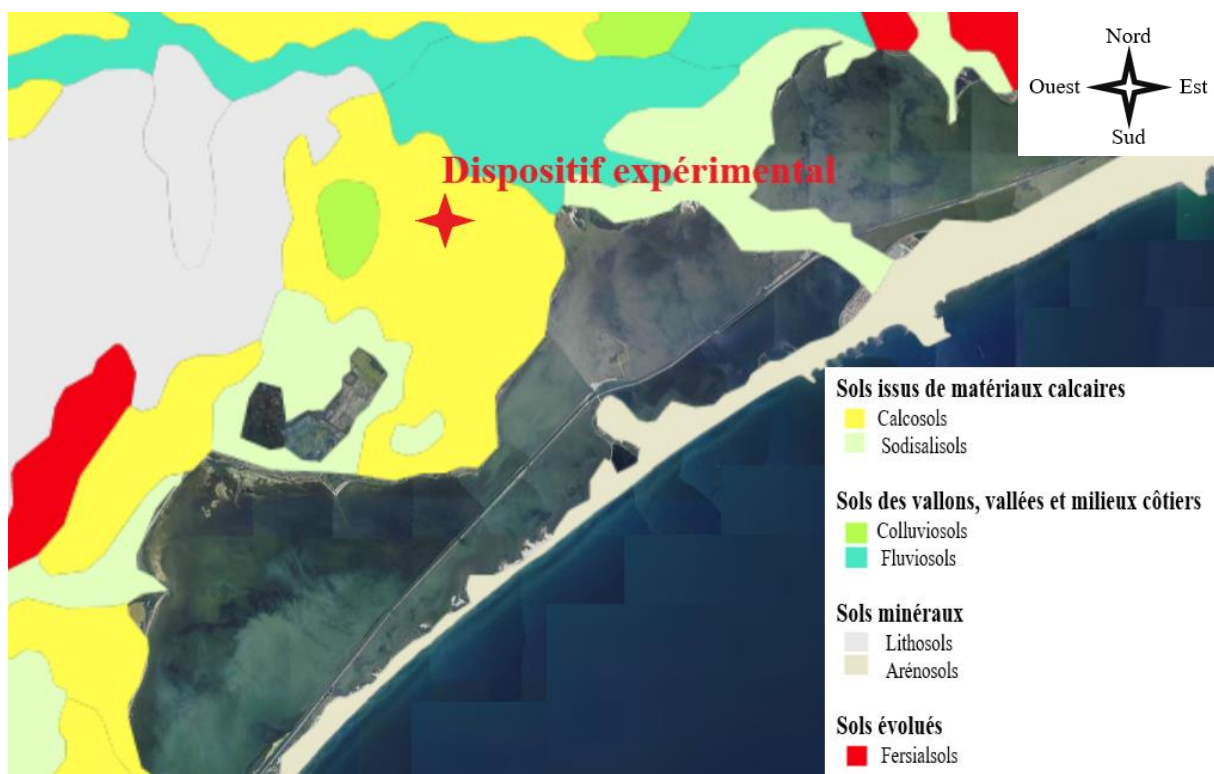
Sur la carte 4, on peut voir au Nord de Villeneuve-lès-Maguelone le massif calcaire de la Gardiole formé de calcaire jurassique karstifié. Sur le reste de la commune, le bassin Mio-Pliocène et Quaternaire de la plaine littorale et ses environs présentent une alternance de marne et de calcaire.

On a donc des complexes lithologiques perméables et un relief plus marqué sur la partie Nord et Nord-Ouest de Villeneuve-Lès-Maguelone (Ville d'accueil du projet Salsa) tandis que sur la

partie Sud et Sud-Est des formations sédimentaires avec des faibles dénivelés. Sur la partie Est des formations sédimentaires qui sont des anciennes terrasses alluviales de la Mosson. Le Sud étant également marqué par la proximité du littoral et des étangs salés du Prévost, de Pierre Blanche et de l'Arnel (le plus proche de la parcelle expérimentale) qui provoquent des formations superficielles composés de vase et de limon (légende LM).

La commune de Villeneuve lès Maguelone est une commune littorale caractérisée par un relief peu marqué. Les altitudes s'échelonnent de 0 mètre au niveau de la mer à 130 mètres au niveau du massif de la Gardiole et de la montagne Saint-Bauzille, partiellement sur le territoire communal et culminant à 185 mètres. Le plateau au nord du territoire a les altitudes les plus élevées, il se prolonge vers le Sud Est par une pente assez accentuée orientée globalement Nord-Ouest/Sud-Est qui se développe vers la plaine littorale.

#### d) Paysage pédologique de la zone d'étude



Carte 5 : Paysage pédologique autour du dispositif expérimental Salsa.

Le paysage pédologique (carte 5) montre des unités typologiques de sol en adéquation avec la carte géologique précédente. Le type de sol sur lequel se situe le dispositif expérimental est un calcosol. Les calcosols sont des sols moyennement épais à épais (plus de 35 cm d'épaisseur), développés à partir de matériaux calcaires. Ils sont riches en carbonate de calcium sur toute leur épaisseur, leur pH est donc basique. Notons que sur site, on trouve des galets roulés avec des minéraux de quartz. Certainement des roches détritiques, type grès, déposées par la Mosson et le littoral à proximité.

Dans ce paysage, les fluviosols encadrent le lit de la Mosson qui passe au Nord de Villeneuve-Lès-Maguelone et du dispositif expérimental. Un colluviosol est également visible et est le témoin d'une doline calcaire (dépression circulaire provoquée par la dissolution des calcaires) au niveau de l'entité géomorphologique formée par l'Estagnol.

Au Nord-Ouest, la roche-mère calcaire (du massif de la Gardiole) est en surface sous forme dure, d'éboulis ou fragmenté (Lithosol).

Pour finir, les étangs salins ont un effet sur les sols en bordure car on observe des Sodisalsols.

e) Description de la texture, profil altimétrique, de l'humidité relative et de la résistivité du sol du dispositif expérimental

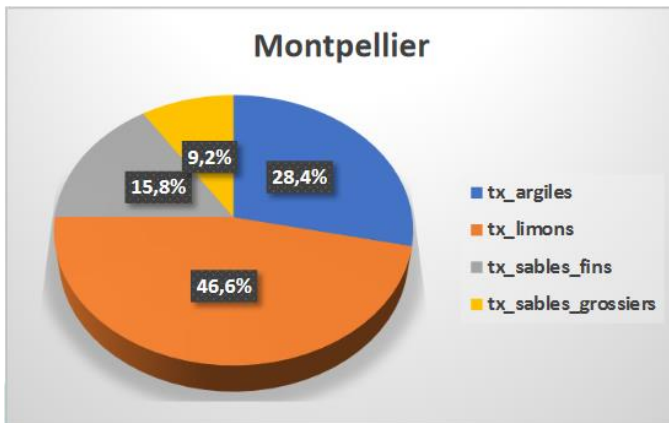
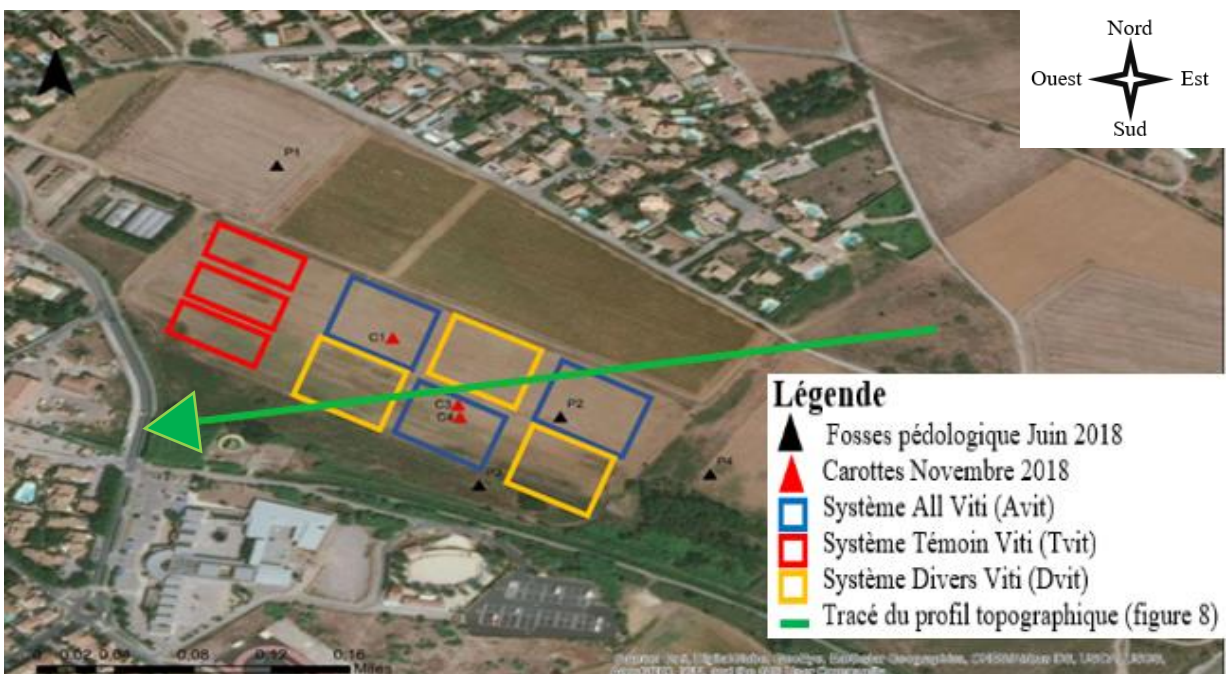


Figure 1 : Texture du sol du dispositif expérimental Salsa.

La texture du sol (figure 1), où est déployé le dispositif Salsa, est limono-argileux. Le sol est majoritairement limoneux car il en possède peu moins de 50 %. Les proportions de sables (grossiers + fins) sont minoritaires mais pas néanmoins négligeable car cela représente 15 % de la texture. Ce sol va avoir des fortes propriétés de rétention d'eau mais la plus grande partie de cette eau est étroitement liée et n'est pas disponible par les végétaux. Cela présentera aussi des difficultés pour certains itinéraires techniques en période de précipitations suffisamment importante pour rendre le sol « collant » et présente un risque de compaction. La teneur en humus est souvent supérieure à celles des autres sols minéraux. Du fait de la forte présence de limon, la teneur en substances nutritives sera normalement plus élevée qu'un même sol avec des textures plus sableuse et les mêmes conditions pédoclimatiques par exemple.



Carte 6 : Axe du profil altimétrique (figure 2) sur le dispositif expérimental Salsa.

Sur la carte 6, on peut voir l'axe du profil altimétrique (figure 2) réalisé sur le dispositif expérimental. On remarque aussi les différents points de mesure (fosses pédologiques et carottes) réalisés pour effectuer cette analyse pédologique. Les photos des fosses pédologiques

seront disponibles dans les annexes (cf. annexe 2 à 5) mais ne seront pas décrites dans ce rapport.

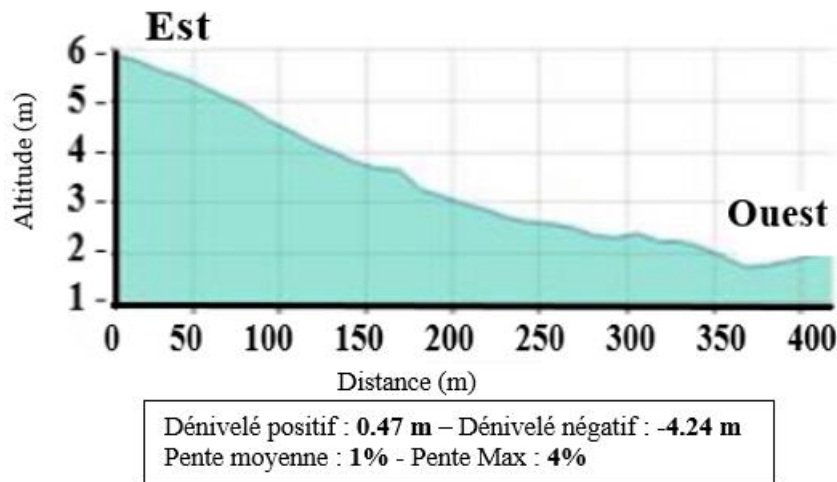
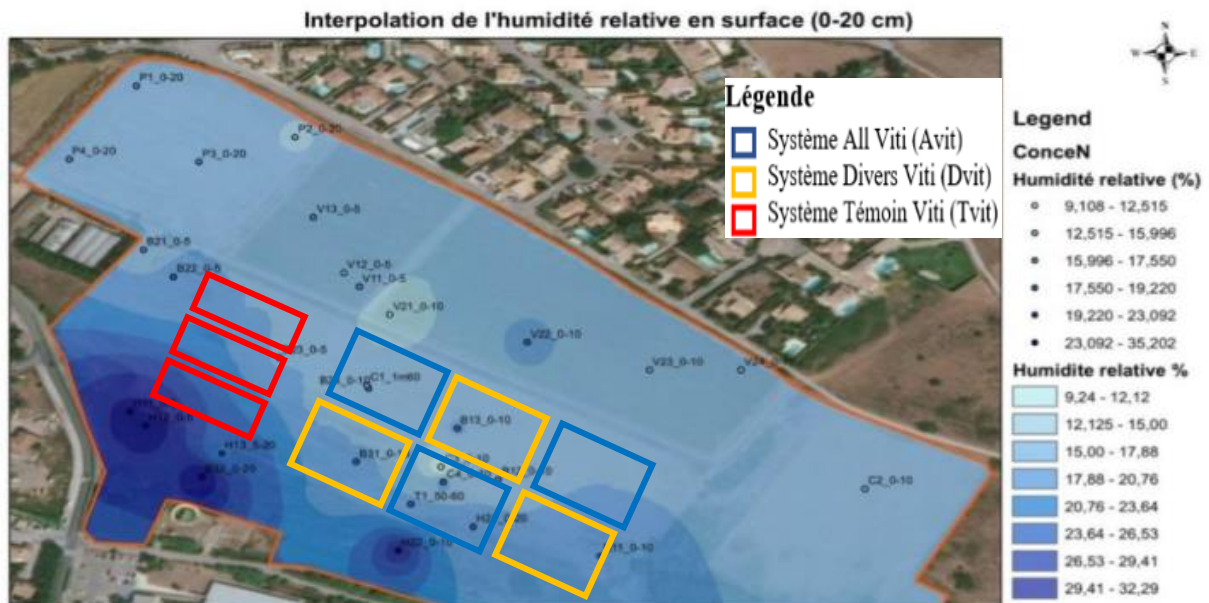


Figure 2 : Profil altimétrique du dispositif expérimental Salsa.

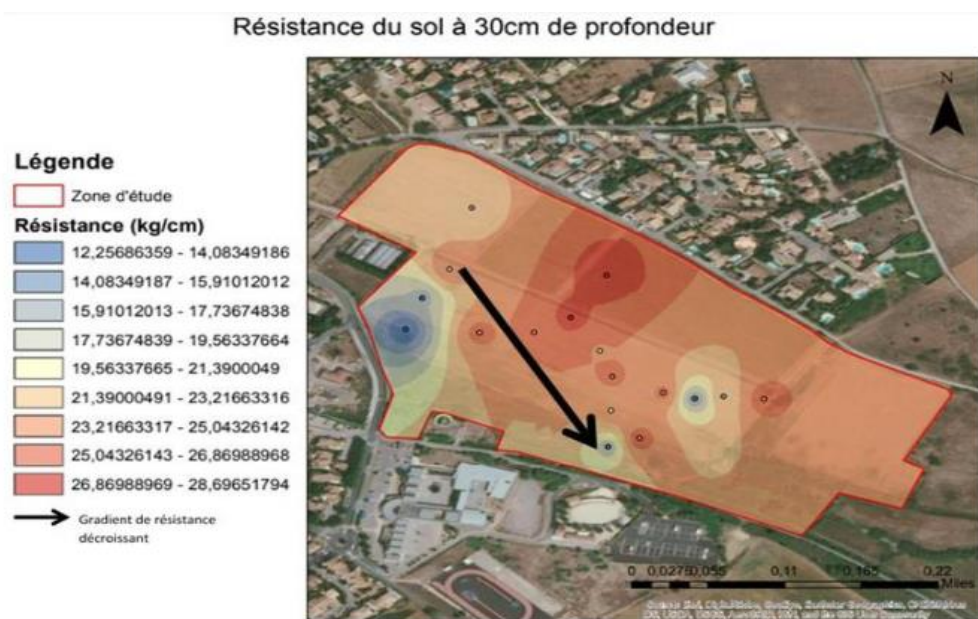
Le profil altimétrique (figure 2) montre un terrain en légère pente qui s’oriente d’Est en Ouest avec une pente moyenne de 1% et pouvant atteindre par endroit 4%. Sur la parcelle, on peut observer l’effet de cette pente par la présence plus importante de cailloutis et une texture plus argileuse en bas de pente.



Carte 7 : Interpolation de l'humidité relative de surface (0-20 cm) du dispositif expérimental Salsa.

On remarque aussi sur la carte 7 la direction et le parcours de l’eau le long de la pente. En effet l’humidité relative est plus élevée (bleu foncé) au point les plus bas de la parcelle. Si l’on regarde la position de nos systèmes et de leurs répliques, les systèmes Tvit sont placés à l’endroit le plus humide de la parcelle. Cela est donc à prendre en compte pour un biais potentiel dans nos analyses. Idem pour le système Dvit qui possède 2 répliques sur 3 (soit 18 placettes sur 24), contre 1 réplique sur 3 pour le système Avit (soit 5 placettes sur 15), en bas de pente où l’humidité relative du sol est légèrement plus importante.

Une humidité relative du sol plus important peut avoir une influence sur plusieurs variables comme l'activité biologique, la température, le pH, la texture, la structure ... (Davie-Martin et al., 2015)



Carte 8 : Résistivité du sol à 30 cm du dispositif expérimental Salsa.

La résistivité du sol (carte 8), montre une hétérogénéité sur la parcelle. On peut voir que la résistivité du sol montre des zones de faible résistivité communes avec la carte d'humidité relative de surface (carte 7). Cependant, toutes ces différences de résistivité ne sont pas expliquées par les différences d'humidité relative de surface mais certainement aussi par d'autres facteurs comme l'hétérogénéité de la pierrosité sur la parcelle que l'on constate in-situ.

## II) Dispositif expérimental et systèmes agroécologiques ou conventionnels

### a) Organisation spatiale du dispositif SALSA de Montpellier



Photo 1 : Photo aérienne réalisé par Clément Enard, technicien INRAE, du dispositif expérimental Salsa avec un rectangle de couleur pour chaque système.

La photo 1 ci-dessus, réalisée par Clément Enard à l'aide d'un drone, montre le dispositif expérimental Salsa avec les 3 systèmes testés. Les carrés de couleur Bleu représente le système Avit (All Viti), le système Dvit (Divers Viti) est en Orange et Tvit (Témoïn Viti) est en Violet/Rouge. L'alternance des carrés Violet/Rouge pour Tvit représente l'utilisation de cépages différents. Violet pour le cépage Artaban et Rouge pour la Syrah. Pour les systèmes Avit et Dvit le cépage utilisé est l'Artaban.

À noter que sur cette photo, les arbres qui se trouvent entre les carrés Bleu et Orange sont des oliviers et ne sont pas inclus dans un des systèmes mais ils permettent visuellement de séparer les répliques des systèmes Avit et Dvit et également d'apporter de la diversité d'habitat pour potentiellement héberger des faunes auxiliaires pour la régulation biologique.

Le système Dvit est le seul système qui contient des arbres (alternance de grenadier et de figuier). Ces arbres sont donc à l'intérieur et au milieu des carrés Orange entre les deux lignes en pointillés elles aussi orange.

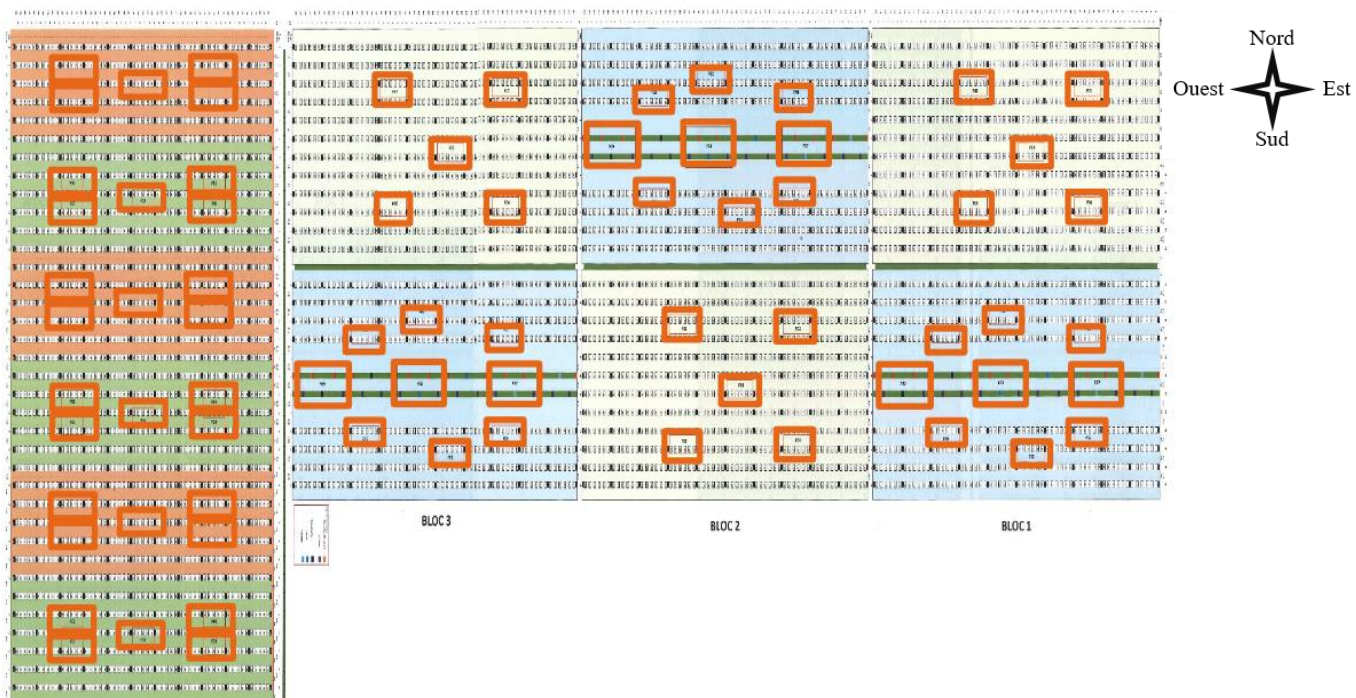


Figure 3 : Schéma du dispositif expérimental avec les différents systèmes (différentes couleurs), les blocs (qui sont les répliques des systèmes) et les placettes (qui sont les points d'échantillonnages des mesures "Biofunctool").

Sur le schéma du dispositif (figure 3), en le détaillant de droite à gauche. Pour les systèmes Dvit et Avit (respectivement Bleu clair et Beige), chaque bloc est une représentation de ces deux systèmes. Il y a 3 blocs, donc 3 répétitions de chaque système. Pour les systèmes Avit (Beige), 5 placettes sont représentées. Une placette (les carrés orange en gras) est une zone délimitée par un nombre de pied de vigne comprenant le rang et les inter-rangs encadrant ces pieds qui est le lieu de toute les analyses que l'on peut y effectuer (analyses de sol, poids de bois de taille, récolte, suivi de couvert végétal...). Il y a donc 15 placettes pour le système Avit (5 placettes \* 3 blocs). Pour le système Dvit, c'est la même idée que pour Avit mais il y a 9 placettes par représentation du système. Pour le système Dvit, il y a plus de placettes car on veut évaluer les arbres, les vignes au Sud des arbres et les vignes au Nord. Ces sous-ensembles du système ont 3 placettes chacun et donc 9 au total pour un système Dvit. Au total pour les systèmes Dvit, il y a 27 placettes (9 placettes \* 3 Bloc à nouveau). On peut également renseigner que les blocs pour les systèmes Avit et Dvit sont dupliqués selon un axe Est/Ouest tandis que pour les Tvit (Vert et orange clair) sur un axe Nord/Sud.

Sur ce schéma, un système Tvit est la somme d'une rectangle Vert et Orange clair (Artaban et Syrah). Un système Tvit comprend 5 placettes pour le cépage Artaban et 5 pour le Syrah. Pour ce protocole, il n'a été utilisé que les placettes pour le cépage Artaban, qui est le cépage représenté sur les systèmes agroécologiques (Avit et Dvit). Le systèmes Tvit au total aura alors 15 placettes.

### b) Système Divers Viti (Dvit)

Les deux systèmes mis en place par l'UMR SYSTEM sont dit agroécologiques/agroforestiers et comprendront tous les deux des couverts végétaux en inter-rang, cependant la différence entre Dvit et Avit est la présence ou non d'arbres fruitiers au sein du système pour évaluer leurs effets d'interaction avec la vigne. En effet Avit comprend 12 rangs tandis que Dvit comprend 8 rangs avec deux rangées d'arbres au milieu du système (figure 4). L'écartement entre tous les rangs est de 2m80 notamment pour le semis des couverts. Entre les arbres et les rangs de vignes un espace de 5,60 est présent avec un couvert spontané à proximité des arbres et une bande fleurie. Tous les inter-rangs de vigne sont des couverts semés avec principalement de la féverole, de l'avoine et de la moutarde.

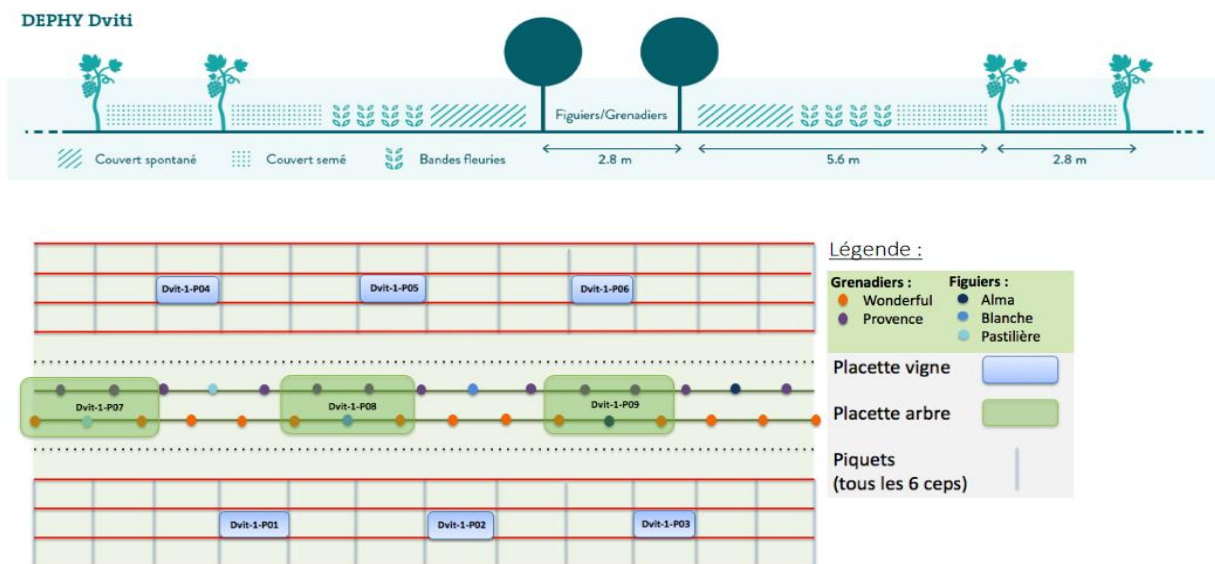


Figure 4 : Schéma du système Divers Viti (Dvit).

L'objectif est d'apporter de la biodiversité d'habitat pour la faune auxiliaire avec la vigne, c'est pourquoi le figuier et le grenadier ont été sélectionnés. Tout d'abord il se trouve que le figuier est d'un réel intérêt pour la biodiversité de la parcelle, il permettrait le développement d'auxiliaires prédateurs (Dubois., 2017). Le grenadier a été choisi pour apporter aussi de la biodiversité mais aussi une production valorisable. De plus, ces deux espèces ne sont quasiment pas traitées dans les systèmes traditionnels ce qui est favorable au mode de conduite agroécologique de la production avec un minimum d'apports en intrants phytosanitaires. Les récoltes de ces arbres fruitiers pourront être vendus au caveau du Domaine du Chapitre sous forme de jus ou de panier.

Les rangées d'arbres sont constituées de l'alternance entre 4 grenadiers et un figuier, séparés les uns des autres de 4 mètres. La première rangée est constituée de grenadiers « Wonderfull » et la deuxième des grenadiers « Provence ». Il y a donc 3 figuiers par rangée, le premier étant un figuier « Alma », le deuxième un « Blanche » et le dernier un « Pastillière ».

Les systèmes dit « agroécologiques » (Avit et Dvit) seront donc entretenus par l'UMR ABSys grâce à des méthodes culturales visant à réduire voire supprimer l'utilisation de produits phytosanitaires, d'amendements inorganiques et d'outil d'entretien des couverts végétaux qui



effectue un travail du sol. Ces alternatives à la culture traditionnelle de la vigne permettront de développer un mode de conduite plus respectueux de l'environnement et des populations à proximité des cultures.

Ce système (Avit aussi) possède un paillage en géotextile biodégradable en fibre de noix de coco et est placé sous les rangs des deux systèmes agroécologiques (Dvit et Avit) afin de limiter la pousse d'adventice sur les rangs et donc d'éviter la concurrence hydrique du couvert avec la vigne.

### c) Système All viti (Avit)

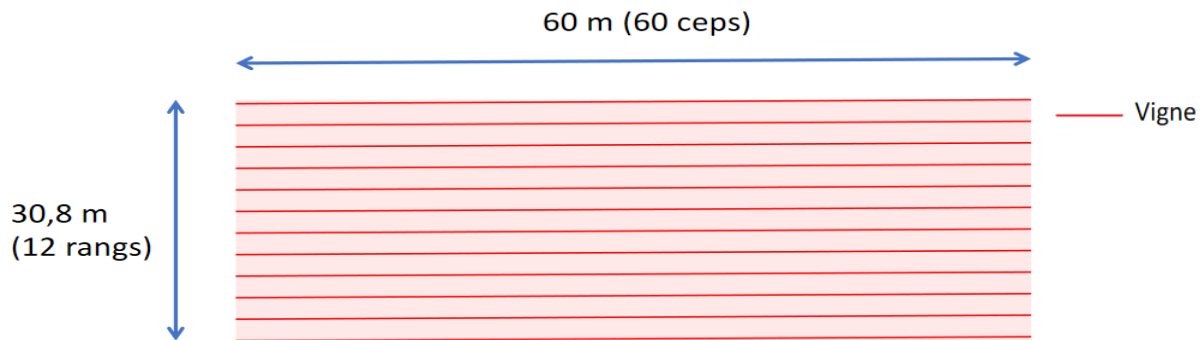


Figure 5 : Schéma du système All viti (Avit).

Sur le schéma (figure 5), on peut observer une répétition du système Avit (Au total 3 répétition car 3 blocs). Une représentation contient 12 rangs de vigne de 60 pieds par rang. La longueur des rangs est de 60 mètres et l'espace entre chaque rang est de 2,80 mètres. Chaque pied de vigne est espacé de 1 mètre. La répétition possède 720 pieds soit au total pour les 3 blocs 2180 pieds.

Comme le système Dvit, plus de travail du sol, des couverts végétaux entretenus et sélectionnés et suppression de produits phytosanitaires et d'amendement inorganiques. Un géotextile en fibre de coco est également appliqué.

### d) Système Témoin viti (Tvit)

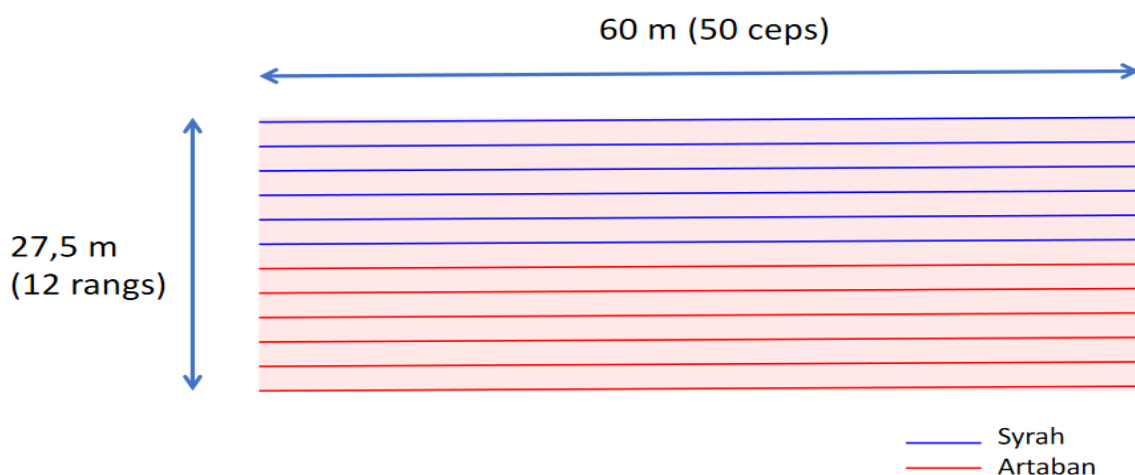


Figure 6 : Schéma du système Témoin viti (Tvit).

Le système Tvit (figure 6), comprend 6 rangs de 50 ceps d'Artaban (cépage résistant) suivis de 6 rangs de 50 ceps de Syrah (cépage sensible). Chaque pied est espacé de 1,20 mètres et les

rangs de 2,50 mètres. Une représentation du système contient donc 300 ceps Artaban et 300 ceps Syrah. Au total, les 3 répétitions Tvit comprennent 1800 pieds de vignes confondus. Sur ce système, l'itinéraire technique est dit « conventionnel » car on y effectue un travail du sol, un désherbage mécanique et chimique avec des produits phytosanitaires ainsi que l'utilisation d'amendement inorganique.

### **III) Biofunctool**

Il semble important d'appliquer des méthodes d'évaluation de l'impact des pratiques agricoles sur le fonctionnement du sol. « Biofunctool » a été créé pour évaluer trois fonctions du sol portées par les assemblages biologiques du sol : dynamique du carbone, cycle des nutriments et maintien de la structure.

« Biofunctool » consiste en l'agrégation de 9 indicateurs de terrain et « low-tech », à travers un index synthétique permettant de scorer la santé des sols. Ces 9 indicateurs seront le résultat d'un score ou d'une valeur avec unité pour chaque indicateur. Il y aura donc 9 variables par point d'échantillonnage.

Ces indicateurs seront complétés par des analyses de pH, de C/N, de carbone total et d'azote total par CHN (Carbone, Hydrogène et Azote). L'analyse CHN se fait par combustion pour oxyder l'échantillon en composés simples qui sont ensuite détectés par conductivité thermique ou spectrophotométrie infrarouge (Matejovic., 1993). Ces analyses supplémentaires ne feront pas l'objet d'explications ou de détails dans cette partie de « Matériels et méthodes ».

Il est préconisé d'appliquer « Biofunctool » à la saison du printemps avant les importantes chaleurs estivales pour avoir des potentiels d'activité biologique du sol importants afin de dissocier des différences induites par les systèmes culturaux. De plus, les 9 indicateurs et les analyses complémentaires doivent être réalisées simultanément sur un point d'échantillonnage pour passer au suivant et non l'inverse. L'objectif étant de ne pas créer de biais pour le point d'échantillonnage. Au total, il y a 57 placettes où l'on va déployer les 9 indicateurs et les analyses complémentaires. Les 57 placettes ne seront pas réalisées le même jour et il pourrait y avoir des changements météo locaux. De ce fait, lorsque qu'une précipitation aura lieu (même si dans cette région elles sont peu fréquentes à cette période de l'année), nous attendrons deux jours après les précipitations pour revenir à un état d'humidité du sol initial.

Un tirage aléatoire (cf. annexe 6) a été réalisé pour déterminer l'ordre de passage des placettes pour inhiber ces potentiels facteurs environnementaux changeants (bien que nous n'en n'ayons pas rencontré lors de cette expérimentation).

Fonction du sol	Nom de l'indicateur	Variable mesurée	Assemblages biologiques	Référence	
Maintien de la structure	<b>AggSoil</b>	Stabilité des agrégats (2-10 cm)	Macrofaune, champignons	Herrick <i>et al.</i> , 2001	
	<b>AggSurf</b>	Stabilité des agrégats (0-2 cm)	Macrofaune, champignons	Herrick <i>et al.</i> , 2001	
	<b>Beerkan</b>	Vitesse d'infiltration	Ingénieurs du sol	Adapté de Lassabatère <i>et al.</i> , 2006	
	<b>VESS</b>	Evaluation visuelle de la structure du sol	Ingénieurs du sol	Guimarães <i>et al.</i> , 2011	
Cycle des nutriments	<b>AEMNO3</b>	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> fixé sur membranes échangeuses d'ions	Tous les micro-organismes	Le Cadre <i>et al.</i> , 2018 ; Qian et Schoenau, 2002	
	<b>NminSoil</b>	Azote disponible (NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> and NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> )	Tous les micro-organismes	Maynard et Kalra, 1993	
Dynamique du carbone	<b>Cast</b>	Densité de turricules de vers de terre	Vers de terre	Appliqué dans Thomas <i>et al.</i> , 2008	
	<b>Lamina</b>	Lamina baits	Mésafaune	Von Törne <i>et al.</i> , 1990	
	<b>POXC</b>	Carbone oxidable au permanganate	Tous les micro-organismes	Weil <i>et al.</i> , 2003	
	<b>SituResp</b>	Respiration basale du sol	Micro-organismes	Thoumazeau <i>et al.</i> , 2017	
	COMPLÉMENT SYST. PERENNES	<b>Fragment</b>	Biomasse de litière fragmentée	Macrofaune	Adapté de Loranger <i>et al.</i> , 2002 ; Ponge <i>et al.</i> , 2002 ; Zanella <i>et al.</i> , 2018
		<b>Skeleton</b>	Biomasse de litière skeletonisée	Macrofaune/Mésafaune	

Tableau 1 : Présentation des indicateurs Biofunctool, des variables mesurées et des assemblages biologiques ciblés.

Sur le tableau 1, on peut voir les indicateurs proposés par « Biofunctool » et il faut préciser que pour des raisons de temps, de coût et de terrain (faible présence de litière surtout pour le système conventionnel avec travail du sol) les indicateurs « Fragment », « Skeleton » et « Cast » n'ont pas été réalisés.

## 1) Dynamique du Carbone

### a) Lamina Baits (Kratz., 1998)

Cette méthode permet de mesurer le degré d'activité de consommation d'un substrat par la mésafaune du sol. Les Lamina Baits permettent d'évaluer la vitesse de disparition d'un substrat organique.

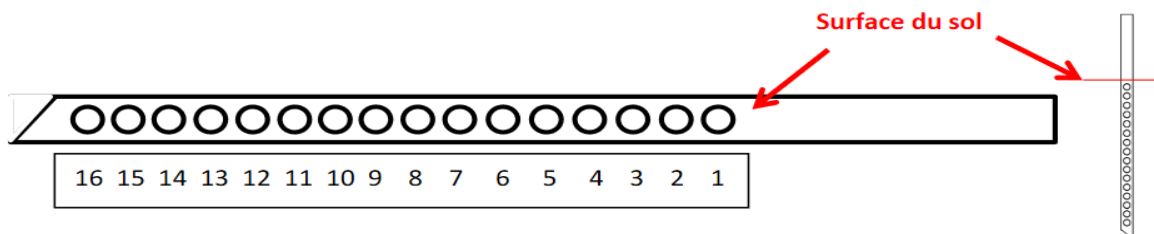


Figure 7 : Schéma d'une languette en PVC pour le test Lamina Baits de "Biofunctool".

Les languettes en PVC (lamina baits) (figure 7) percées de 16 trous de 1,5 mm de diamètre sont remplies d'un substrat organique, qui peut être fabriqué ou fournis par le laboratoire Terra Protecta. Le substrat des languettes est constitué de 70% de cellulose et de 30 % d'agar. De l'eau distillée est ajouté pour permettre au mélange de devenir pâteux pour l'appliquer facilement dans les trous des languettes. Plusieurs couches (minimum 3) sont posées et séchées.

8 lamina baits par point d'échantillonnage sont plantées verticalement dans le sol, espacées de 30 cm. L'activité des organismes du sol est évaluée à travers la consommation de ce substrat, en comptant le nombre de trous ayant subi une dégradation visible du substrat suite à la période d'incubation dans le sol. Les lamina sont retirés quand environs 80% des trous contenant le substrat sont consommés, ce qui peut impliquer une incubation de 1 à 3 semaine (12 jours dans cette étude) en fonction des conditions pédoclimatiques. La 1ère lamina sert de « lamina de référence » pour vérifier le pourcentage de dégradation à des pas de temps réguliers, le calcul de décomposition se faisant sur les 7 restantes.

Pour attribuer le score au point d'échantillonnage (tableau 2), chaque trou est scoré de 0 à 1. Ensuite une moyenne est attribuée à chaque languette pour faire une moyenne des 7 lamina baits du point d'échantillonnage. Cette moyenne est alors divisée par le nombre de jour d'incubation.

Tableau 2 : Tableau d'attribution des scores par trou d'une languette PVC (Lamina Baits) en fonction de l'état de dégradation du contenu cellulosé.

Etat de dégradation	Pas de dégradation	Dégradation partielle	Dégradation totale	Présence de sol à la place du substrat
Score sur le terrain	0	0.5	1	S (NA en stats)

$$\text{Score par lamina (\%deg j}^{-1}\text{)} = \frac{\text{Moyenne (score 16 trous)}}{\text{Temps d'incubation(jour)}}$$

$$\text{Score pour un point d'échantillonnage (\%deg j}^{-1}\text{)} = \text{Moyenne (score des 7-8 laminas)}$$

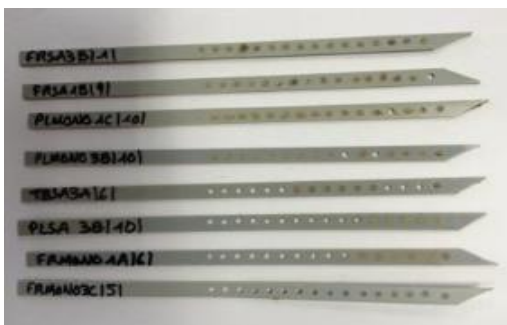


Photo 2 : Les 8 languettes PVC après avoir incubées 10 jours dans le sol. Les états de dégradation est visible pour certain trou.

#### b) POXC, Permanganate Oxydable Carbon (Culman et al., 2012).

L'objectif est de mesurer le pool de carbone labile du sol, qui correspond à la matière organique accessible par les organismes du sol.

Par cette méthode on mesure la quantité de carbone oxydable au permanganate de potassium (d'où le nom : Permanganate Oxydable Carbon [POXC]). Le permanganate de potassium est un composé chimique coloré. On peut donc avec un spectrophotomètre mesurer la quantité de  $\text{KMnO}_4$  en faisant au préalable une calibration de l'appareil avec des quantités connues de  $\text{KMnO}_4$  (figure 8). On peut ainsi faire correspondre une absorbance (intensité colorimétrique de la solution à une longueur d'onde de 550 nm) avec une quantité de  $\text{KMnO}_4$ .

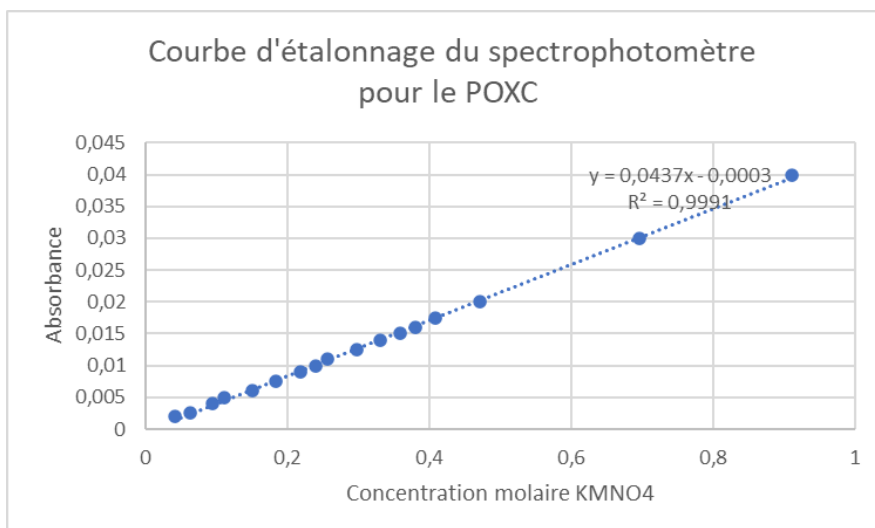


Figure 8 : Courbe d'étalonnage du spectrophotomètre en fonction de concentration connue de KMNO4 et de l'absorbance du spectre lumineux à une longueur d'onde de 550 nm).

Le sol sec est mis en contact avec une solution aqueuse de permanganate de potassium dilué (0.02 M). Le permanganate de potassium KMnO4 (0.02M) est un oxydant, ainsi dilué, il réagit avec les formes les plus facilement oxydable du carbone actif et en abaissant proportionnellement l'absorbance (par la consommation de KMNO4). La concentration du permanganate non réduit dans la solution après contact est mesurée par colorimétrie. Plus l'absorbance est faible, plus la quantité de carbone labile sera élevée.

Pour réaliser cette expérience, il faut prélever du sol à 0-10 cm de profondeur et le tamiser à 2mm. En laboratoire, il faut mettre l'échantillon à l'étuve à 60°C pendant 48 heures. Après le séchage, 2,5g de sol seront prélevés et mélangés avec 18 mL d'eau distillé et 2 mL de KMNO4 à 0.1M. Les solutions seront placées dans des tubes falcon et agitées pendant 2 min avec un mélangeur automatique (cela peut être fait à la main mais sera moins précis concernant la réaction chimique car le rythme sera différent en fonction du manipulateur ou de la fatigue). Pour finir, 0.5ml de solution seront récoltées et placées dans une cuvette pour la lecture au spectrophotomètre (préalablement calibré).

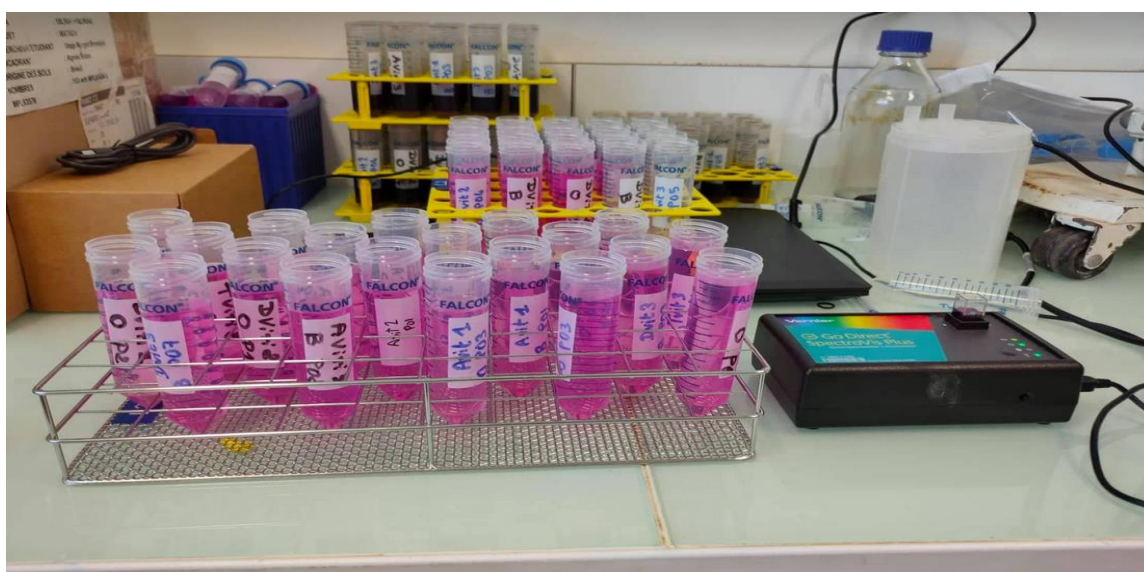


Photo 3 : Photo de la paillasse avec tous les échantillons de sol ayant réagis avec les solutions de KMNO4. À droite le spectrophotomètre en cours de mesure de l'absorbance d'un échantillon.

Pour attribuer une quantité de carbone labile du sol par point :

$$\text{POXC} = ([\text{KMnO}_4] - (\alpha + \beta \cdot \text{Abs})) \times C_{\text{ox}} \times (\text{Vol}_{\text{KMnO}_4} / M_{\text{sol}})$$

POXC (mg kg<sup>-1</sup>soil) : carbone labile du sol

[KMnO<sub>4</sub>] (mol L<sup>-1</sup>) : concentration initiale de la solution de KMnO<sub>4</sub> (0.02)

C<sub>ox</sub> (mgC mol<sup>-1</sup>) : quantité de C oxydé avec 1 mole de MnO<sub>4</sub> (9000)

Vol<sub>KMnO<sub>4</sub></sub> (L) : volume du KMnO<sub>4</sub> ayant réagi (0.02)

M<sub>soil</sub> (kg) : masse du sol (0.0025)

α: ordonnée à l'origine de la courbe standard

β: pente de la courbe standard

Abs: absorbance lue à 550nm

### c) SituResp, la respiration basale du sol (Thoumazeau et al., 2017).

L'objectif est d'évaluer la respiration basale du sol sur le terrain (= émission de CO<sub>2</sub> du sol par l'activité microbienne). La respiration basale est utilisée comme un indicateur de l'activité microbiologique du sol.

Le principe de SituResp est d'évaluer les émissions en CO<sub>2</sub> d'un échantillon de sol frais (100g), grossièrement tamisé (5mm). Le sol est déposé dans un bocal hermétique auquel on ajoute une cuve contenant un gel coloré dont la couleur est sensible aux variations de pH. Le CO<sub>2</sub> émis par le sol va être capté par le piège alcalin contenu dans le gel, et ainsi modifier le pH du gel et donc sa couleur. La mesure du changement de couleur du gel (via une différence d'absorbance à une longueur d'onde de 570 nm) permet d'estimer la quantité de CO<sub>2</sub> émise par le sol.



Photo 4 : Photo du matériel nécessaire pour mesurer la respiration basale du sol (SituResp). À droite, la cuvette est placée dans un contenant en plastique pour éviter le contact du gel et du sol.

La photo 4 montre, à gauche, la verrerie utilisée avec son opercule pour isoler hermétiquement le sol et le gel de l'atmosphère extérieure. À droite, on distingue la cuvette glisser à l'intérieur d'un petit récipient en plastique pour ne pas que du sol ne vienne se coller sur le gel ou qu'il s'enfuisse et salisse l'extérieur de la cuvette pour la lecture au spectrophotomètre.

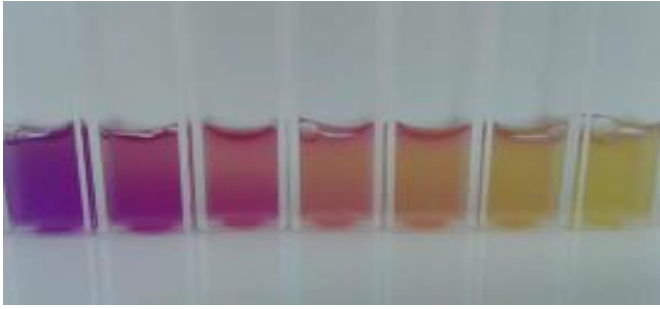


Photo 5 : Différence colorimétrique du gel SituResp en fonction de la respiration basale du sol. L'intensité croissante d'émission de CO<sub>2</sub> du sol se lie de gauche à droite (du violet vers le jaune).

Sur la photo 5, on peut voir des cuvettes pour spectrophotomètre remplies de gel. De gauche à droite, la décoloration du gel est corrélée avec une quantité croissante de CO<sub>2</sub> capté par le gel. Au départ le gel est violet et après 24 heures d'incubation avec du sol frais, si le sol émet des quantités importantes de CO<sub>2</sub>, le gel virera alors vers le jaune pâle. Dans le cas contraire, il restera violet. Cette différence de couleur entre l'absorbance à T0 et T24 donnera notre score pour la respiration basale du sol comme indiqué ci-dessous.

$$\text{SituResp} = \text{Abs}_{T0} - \text{Abs}_{T24}$$

Abs<sub>T0</sub> = Absorbance à T0, avant incubation.

Abs<sub>T24</sub> = Absorbance après 24 heures d'incubation.

## 2) Cycle des nutriments

Après avoir réalisé la récolte les solutions des membranes échangeuses d'ions (AEMNO3) (partie a) ou de l'extraction d'azote minéral du sol (NminSol) (partie b), elles doivent être analysées en laboratoire par flux continu. Les informations et les protocoles pour le flux continue seront détaillés dans une partie (c) mais il est important de comprendre que cela ne fait pas partie d'un indicateur de « Biofuntool » mais d'un complément d'analyse au AEMNO3 et NminSol.

### a) AEMNO3, les membranes cationiques ou anioniques échangeuses d'ions (Cadre et al., 2018).

Le but de cette méthode est d'évaluer la dynamique des nutriments disponibles dans le sol grâce à l'utilisation d'une membrane échangeuse d'ions qui adsorbe facilement les nutriments en solution.

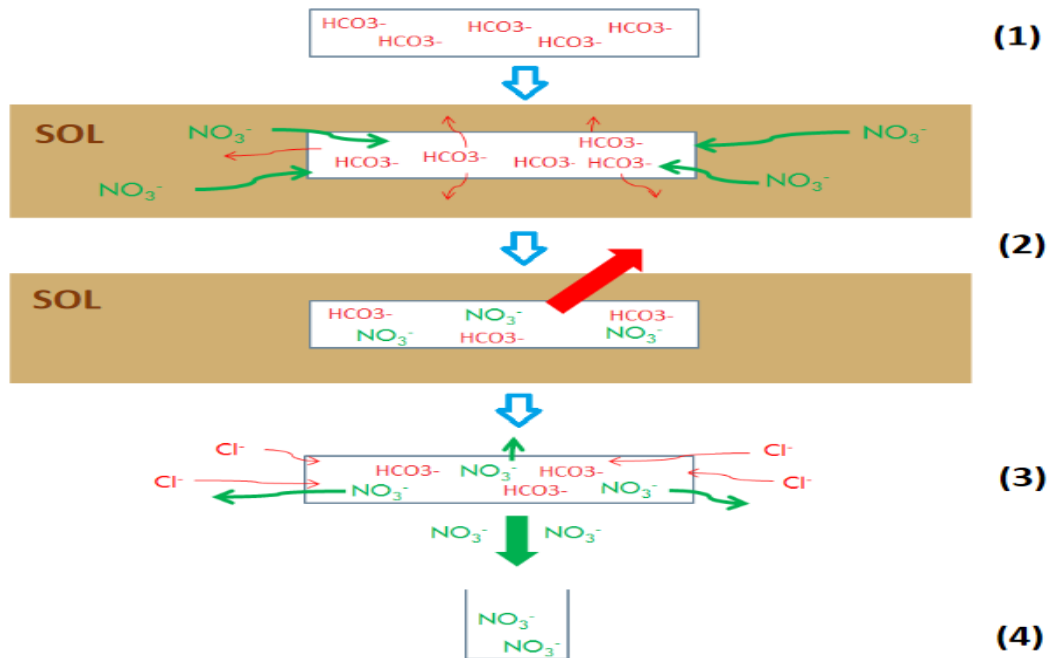


Figure 9 : Illustration du processus de la membrane échangeuse d'anions chargée en  $\text{NaHCO}_3$ .

Explication de la figure 9 : Le principe est tout d'abord de charger une membrane dans une solution saturée en ions (1). Une fois la membrane chargée, on va l'enfouir dans le sol environ 2-3 semaines. L'interaction avec les ions du sol se produira et on aura un échange entre les ions contenus dans le sol et ceux de la membrane (2). Après avoir retiré la membrane du sol, celle-ci est plongée dans une solution fortement chargée afin de désorber les ions fixés (3). Les ions du sol contenus dans la solution d'extraction au KCl sont alors dosés (4).



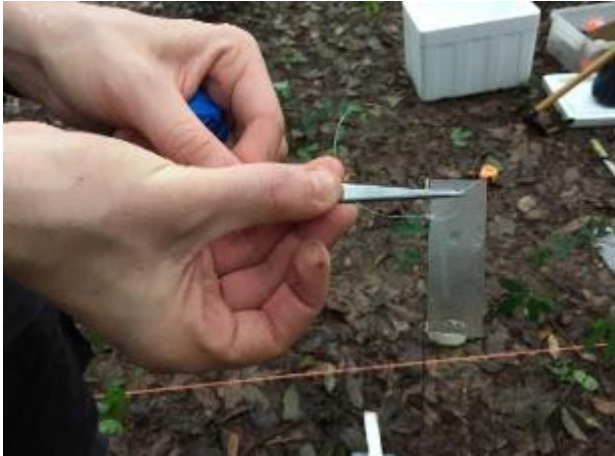


Photo 6 : Membrane échangeuse d'anions juste avant l'enfouissement. Chaque membrane est nouée avec du fil en nylon pour la récupérer facilement à la fin de l'incubation dans le sol.

Sur la photo 6, on peut observer la mise en place d'une membrane (anionique car les cationiques sont orangées). Les membranes sont raccordées avec du fil en nylon à des piquets que l'on positionnera juste au-dessus du trou où ont été enterrées les deux membranes.

Pour charger les membranes afin qu'elle puisse captés des anions ou des cations en solution dans le sol, il est nécessaire de les tremper dans des solutions durant 24 heures minimums, au préalablement préparées en laboratoire.

- Pour les **membranes anioniques**, dans une solution de  $\text{NaHCO}_3$  à 0.5M.
- Pour les membranes cationiques, dans une solution de  $\text{NaCl}$  à 0.5M
- 

Il y a donc deux membranes à placer par point d'échantillonnage, une membrane anionique (qui est censé capter les ions négatifs en solution dans le sol comme  $\text{NO}_3^-$  et  $\text{NO}_4^-$ ) et une membrane cationique (pour capter les ions positifs comme  $\text{NH}_4^+$  et  $\text{NH}_3^+$ ). Après avoir passé 12 jours dans le sol (à 20 cm de profondeur), comme les lamina baits, les membranes sont mises et placées dans une solution de  $\text{KCl}$  à 1M pour extraire les ions précédemment captés. On récupéra les deux solutions de  $\text{KCl}$  et contenant les ions extraient des membranes anioniques ou cationiques par point pour le dosage par flux continu.

Pour quantifier les nutriments absorbés par nos membranes, nous utiliserons la formule suivante.

$$\text{Nutriments adsorbés sur la membrane } (\mu\text{g cm}^{-2} \text{ j}^{-1}) = a \times b / c \times d$$

- a= résultats de l'analyse de laboratoire ( $\mu\text{g L}^{-1}$ )
- b= volume de la solution d'extraction (L); b=0.035L dans notre cas
- c= surface d'échange de la membranes en  $\text{cm}^2$
- j = nombre de jour d'incubation dans le sol

**b) NminSol, Extraction azote minéral (McTaggart et Smith., 1993).**



*Photo 7 : Photo de la préparation des flacons et des échantillons de sol associés pour réaliser l'extraction avec le KCl.*

L'extraction d'azote minéral a pour but de quantifier les nutriments disponibles dans le sol. Cette méthode est complémentaire du protocole des membranes échangeuses d'ions. Le principe consiste à mesurer l'azote disponible à travers l'extraction de nutriments du sol (100 g de sol).

L'extraction est directement faite sur le terrain avec une solution de 1M de KCl. La mesure quantitative de nutriment de l'extraction sur le terrain sera faite en laboratoire par flux continu.

Il est important de connaître (ou de mesurer en complément des autres tests) les données du taux d'humidité du sol et la densité apparente du sol car ils seront nécessaires pour analyser les anions et cations ciblés dans la solution.

Pour les résultats,

**NminSoil** (mgN kg<sup>-1</sup> sol) = résultats du dosage au laboratoire ajusté à la teneur en eau du sol

**c) Dosage par flux continue (Ruzicka et Hansen., 1988).**

Le flux continu est une technique automatique d'analyse par colorimétrie. Une pompe péristaltique apporte l'échantillon et les réactifs au travers d'un circuit réactionnel (dialyse, chauffage, membrane, réaction colorimétrique, ...) et le produit de la réaction arrive au niveau d'une cellule spectrophotométrique où l'intensité de la coloration est mesurée. Les échantillons sont séparés dans les tubes par de l'air et par la solution de rinçage (KCl).

Le dosage des nitrites et nitrates (NO<sub>3</sub><sup>-</sup> et NO<sub>2</sub><sup>-</sup>) se base sur la méthode par réduction sur une colonne de cadmium après une dialyse (nettoyage de la colonne avec du KCl pour éliminer les restes de l'échantillon précédent). L'échantillon est dilué avec un tampon basique (pH = 8.2) et passe sur une colonne de grains de cadmium recouverts de noir de cuivre pour réduire les nitrates en nitrites. Les nitrites (Nitrates réduits en nitrites et les nitrites déjà présent) donne une réaction de diazotation avec la sulfanilamide, puis un couplage avec du chlorhydrate naphthyl-

éthylènediamine, pour former une solution rosée dont l'intensité sera mesurée sur une longueur d'onde à 540 nm et sera proportionnel aux quantités de Nitrates et Nitrites de l'échantillon.

Le dosage de l'azote ammoniacal ( $\text{NH}_4^+$ ) se fait via la méthode Berthelot. L'ammonium est chloré en monochloramine et réagit avec le salicylate. Après cette oxydation, il se forme un complexe de couleur verte. Là aussi l'intensité colorimétrique sera mesurée sur une longueur d'onde de 660 nm et sera proportionnelle avec la concentration initiale en ammonium.

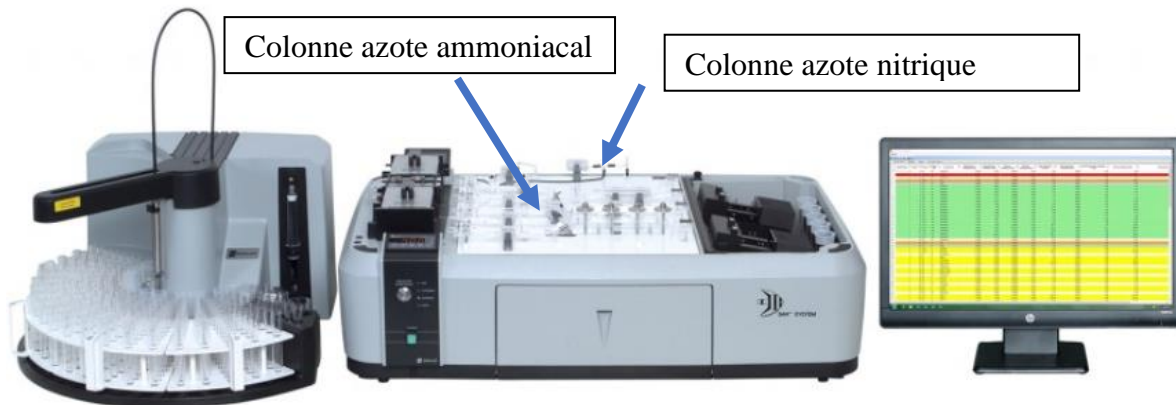


Photo 8 : Analyseur à flux continu Skalar.

### 3) Maintien de la structure du sol

La structure du sol est l'agencement dans l'espace de ses constituants. Elle est déterminée par la forme des agrégats. La structuration naturelle des sols est notamment liée à leur texture et l'activité biologique. Un sol argileux aura notamment une structure angulaire, avec formation de lamelles. En revanche, une structure grumeleuse (fréquente sous prairie) est plutôt liée à l'activité biologique.

La porosité est le volume des "vides" du sol, les pores. C'est par les pores que circulent l'eau et les gaz dans le sol. Ils sont donc importants par leur quantité, mais également par la qualité de leur organisation. L'essentiel étant que toute la porosité forme un réseau continu sans ruptures (semelles, compactations, mottes delta...).

Le tassement correspond à une perte de porosité et à une dégradation de ce réseau. C'est un problème récurrent lorsque le trafic sur la parcelle est mal géré et il conduit.

#### a) VESS, évaluation visuelle de la structure du sol (Guimarães et al., 2011).

Cet indicateur proche de l'indicateur issu du test bêche, propose d'évaluer la structure du sol liée à ses propriétés physiques, à l'activité biologique et à la culture étudiée (racines). Il considère de manière intégrée la forme, la taille, la facilité à briser les agrégats de différentes profondeurs d'un bloc de sol. Le score optimal à atteindre pour ce test est fixé à 2 selon la classification sur le tableau 3.



Photo 9 : Les différentes étapes pour exhumer un carré de sol de 20 cm\*20cm.

La méthode VESS (Visual Evaluation of Soil Structure) se base sur une description visuelle de la structure des différentes couches d'un bloc carré de sol de 20cm\*20cm de surface, et de 25 cm de profondeur. La description est guidée par une fiche descriptive (tableau 3) qui caractérise différents paramètres de structure de chaque couche de sol. Le score final se calcule en moyennant chaque score attribué à chaque couche, entre 1 (sol très friable sans structure) et 5 (sol très compact). Des mesures de pénétrométrie peuvent aider à la distinction des couches et à la mesure de la compaction du sol.

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
<b>Sq1 - Friable</b> Agrégats se désagrègent très facilement entre les doigts	La plupart des agrégats < à 0.6 cm	Racines 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
<b>Sq2 - Intact</b> Agrégats se désagrègent facilement entre les doigts	Mélange d'agrégats arrondis de 2mm à 7mm	Racines colonisent l'ensemble du bloc. La plupart des agrégats sont poreux		Forte porosité des agrégats	Agrégats arrondis, fragiles poreux qui se cassent facilement
<b>Sq3 - Ferme</b> La plupart des agrégats se désagrègent facilement entre les doigts	Mélange d'agrégats de 2mm-10cm. 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 retraits		Faible porosité des agrégats	Agrégats avec peu de pores visibles et plutôt arrondis
<b>Sq4 - Compact</b> Assez difficile de briser les mottes fermées avec une seule main	Principalement mottes fermées subangulaires >10 cm Structure lamellaire possible Moins de 30% <7cm	Racines concentrés autours 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
<b>Sq5 - Très compact</b> Très difficile de briser les mottes fermées avec les mains	Mottes angulaires >10cm très peu de taille <7cm	Pas ou peu de racines. Très peu de « pores visibles 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

Tableau 3 : Attribution des scores pour le test VESS en fonction de différents critères (Qualité de la structure, taille des agrégats, porosité...). Le score optimal pour ce test est fixé à 2.

**b) Beerkan, l'infiltration de l'eau dans le sol (Lassabatère et al., 2006).**



Photo 10 : Mesure de la capacité d'infiltration du sol (Beerkan).

Le potentiel d'infiltration de l'eau dans le sol est particulièrement important dans les agrosystèmes car elle est reliée à des services écosystémiques importants comme la limitation du processus d'érosion, le cycle des nutriments et leur disponibilité pour la plante. L'infiltration est largement favorisée par l'activité des organismes du sol, et particulièrement les ingénieurs du sol. La méthode « Beerkan » a pour but de mesurer le potentiel d'infiltration du sol sur le terrain.

Un volume d'eau fixe de 1cm de hauteur d'eau (310mL pour cylindre de diamètre de 20cm) est versé sur la surface du sol. Le temps d'infiltration dans le sol est mesuré pour chaque volume d'eau. Il est alors possible de calculer le taux d'infiltration de l'eau en ml par minute grâce à la courbe d'infiltration de l'eau à son état d'équilibre (voir figure ci-dessous).

Le nombre de volume maximal que l'on peut verser est de 10 ou alors si l'infiltration dépasse 30 minutes avant d'avoir atteint les 10 volumes.

Pour les résultats de chaque point :

Il faut transformer le temps mesuré en seconde (exemple : 2 minutes et 30 secondes = 150 secondes). Graphique avec en abscisse le temps cumulé et en ordonné le volume cumulé (cf figure ci-dessous) avec une droite de régression volume = f(temps) seulement sur les points du régime permanent (points à l'état d'équilibre [points bleus]). C'est-à-dire sur les points qui forment une droite linéaire et enlevé de son calcul de pente les points du régime transitoire (points rouge).

Le taux d'infiltration correspondra à la mesure de la pente de la droite de corrélation  $y = ax+b$ . « a » correspondra donc à la vitesse d'infiltration de l'eau en ml/sec.

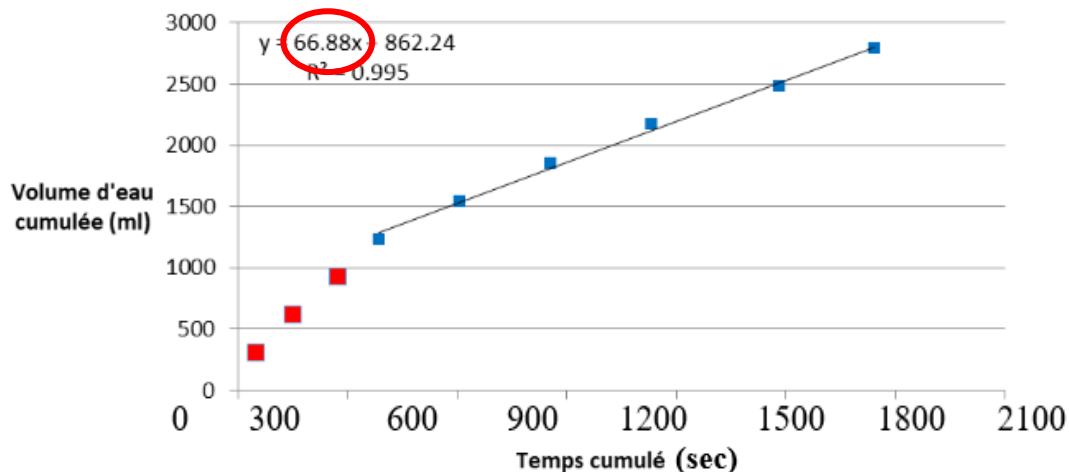


Figure 10 : Droite de régression entre le temps d'infiltration (en sec) et le volume d'eau cumulé infiltré (mL).

c) **Stabilité des agrégats (Herrick et al., 2001).**



Photo 11 : Mesure in-situ de la stabilité des agrégats. 18 agrégats sont chronométrés en même temps pour l'attribution de leurs scores. 6 agrégats sont évalués pour le score d'une placette.

Cette méthode mesure la stabilité des agrégats du sol lors d'une immersion dans l'eau. Ils sont composés de particules de sable, de limon, d'argile et de matière organique. À l'échelle microscopique, ces particules sont liées entre elles par du calcium, de l'humus, des exsudats racinaires et bactériens ainsi que par des hyphes fongiques (Tang et al., 2011). Ces éléments contribuent à la formation et à la stabilisation des agrégats dans le sol.

Une bonne stabilité des agrégats signifie que les particules du sol résistent à l'érosion hydrique ou éolienne. Le principe du protocole est basé sur l'attribution d'un seul score lié à la stabilité des agrégats dans l'eau. Les agrégats sont prélevés à deux profondeurs, 3 agrégats à 0-2 cm et 3 autres à 2-10cm. Par point d'échantillonnage nous aurons donc le score de 6 agrégats. Le score est attribué en fonction du pourcentage de désagrégation ou de dispersion de l'agrégat dans l'eau au cours du temps à travers deux étapes successives. Tout d'abord, les agrégats, auparavant séchés à l'air, sont immergés dans l'eau durant 5 minutes (étape 1). Ensuite, ils sont soumis à un mouvement de va-et-vient dans l'eau (étape 2).

De plus, la stabilité des agrégats de surface (0-2 cm) et profond (2-10 cm) ont été combinés. Il faut normalement prélever 6 agrégats de chaque profondeur et les scorer selon la méthode. Ici pour chaque point d'échantillonnage, il a été prélevé 3 agrégats de surface et 3 agrégats profond.

Tableau 4 : Scores attribués aux agrégats en fonction du temps passé en immersion dans l'eau et du pourcentage de dégradation.

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

## IV) Statistique(s)

Les figures de la partie « Résultats » ont été élaborées par l'intermédiaire du package « ggplot2 » de Rstudio.

### a) Test ACP.

L'analyse en composante principale a été réalisée sur Rstudio avec la fonction PCA().

### b) Calcul des p-values pour chaque indicateur en fonction des systèmes.

L'homoscédasticité et la normalité des données pour chaque indicateur ont été vérifiées avec un test de Barlett (fonction bartlett.test de Rstudio) et un test de Shapiro (fonction shapiro.test). Tous les indicateurs ont validé ces tests.

Ensuite, un model Anova a été calculé avec la fonction aov() sur Rstudio. Les indicateurs pour lesquels les résidus de l'Anova suivaient une loi normale (Test de Shapiro) un test post hoc de TukeyHSD (fonction TukeyHSD de Rstudio) ont été effectués pour le calcul des p-value. Pour les indicateurs dont les résidus de l'Anova ne suivaient pas une loi normale (p-value < 0.05 pour le test Shapiro), un model de Kruskal-wallis et un test post hoc de Wilcoxon (fonction wilcox.test) ont été préférés pour le calcul des p-value.

### c) P-values des indicateurs en fonction des blocs pour chaque système.

Tout d'abord, la comparaison des blocs n'est pas possible car les blocs 1, 2 et 3 du système Tvit (le système témoin de référence) ne sont pas les mêmes que les blocs 1, 2 et 3 des systèmes Avit et Dvit. On ne peut donc pas comparer les valeurs de nos indicateurs selon les blocs tous systèmes confondus. On peut en revanche regarder au sein de chaque système s'il y a une influence du bloc sur les valeurs de nos indicateurs. On pourra alors dire quel bloc surévalue ou sous-évalue un indicateur pour un système selon ses blocs et savoir si la représentation du système (les 3 blocs compris) est de qualité.

La même trame a été suivie pour calculer nos p-values en regardant avec un test shapiro la normalité des résidus de l'Anova. Si les résidus ne suivent pas une loi normale, un model de Kruskal-Wallis et un test post hoc de Wilcoxon ont été préférés. Dans le cas contraire, une Anova et un test de TukeyHSD ont été réalisés.

### d) Régression linéaire et coefficient de corrélation.

Les régressions linéaires ont été tracées avec la fonction lm() de Rstudio. Les coefficients de corrélation ont été calculés avec la fonction cor.test() de Rstudio selon la méthode Pearson.

### e) Calcul des indices de qualité des sols.

Le principe est d'agrèger les différents indicateurs de qualité du sol en un score entre 0 et 1 (en normalisant tous les indicateurs) en s'aidant de leur contribution respective dans une analyse multivariée de type ACP. On utilise les valeurs de contribution de chaque individu aux différentes dimensions (qui possède un eigvalue > 1) de l'ACP. On multiplie ensuite les scores normalisés (avec la fonction scale() de Rstudio) de chaque individu avec leurs

contributions à l'ACP et on fait une moyenne des 3 indicateurs qui représentent l'un des trois groupes de variables « biofunctool » pour avoir le score du groupe. Le score total correspond à la somme des 3 groupes de variables.

## Résultats

### 1) Dispersion statistique des variables et indicateurs « Biofunctool ».

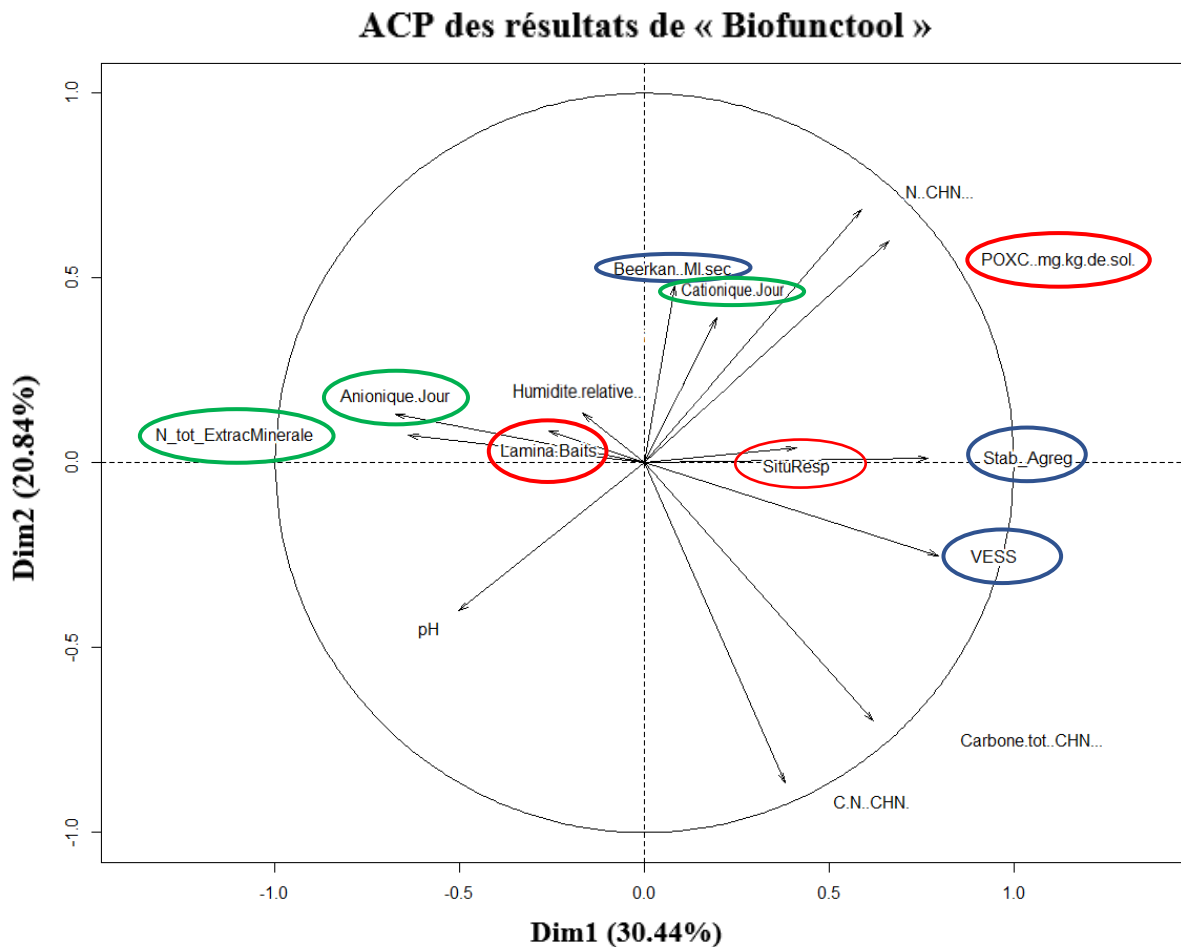


Figure 11 : Analyse en composantes principales (ACP) des indicateurs "Biofunctool". Pour déterminer le nombre d'axes à prendre en compte, il a été choisi de ne retenir que les axes dont les valeurs propres sont supérieures à 1 (c'est le critère de Kaiser).

Sur la figure 11, les indicateurs qui sont proches d'un des axes, et assez loin de l'origine sont des points explicatifs pour l'axe, est sont bien représentés sur le plan factoriel. La corrélation de chaque point sur un axe exprime donc la qualité de représentation du point sur l'axe. Elle prend des valeurs entre 0 (pas corrélé du tout) et 1 (fortement corrélé). Si deux indicateurs sont proches et avec un angle plutôt fermé (en partant de l'origine), cela indique que ces 2 variables sont assez bien corrélées entre elles. Au contraire des variables indépendantes, auront un angle droit ou ouvert.

Les points situés près du centre sont généralement mal représentés par le plan factoriel. Leur interprétation ne peut donc pas être effectuée avec confiance.



Tout d'abord, sans considérer les groupes de variables (les indicateurs entourés d'ovale colorée), on remarque que le rapport C/N et Carbone total par CHN sont assez proche sur cette représentation (bien qu'ils ne soient pas proche d'un des deux axes) mais sont indépendants avec l'indicateur POXC qui mesure pourtant le carbone labile du sol. Idem avec l'azote total par CHN qui est indépendante du C/N et carbone total alors que ces trois analyses sont réalisées avec le même instrument.

L'humidité relative du sol semble mal représentée sur la plan factoriel (car proche du centre du cercle) et n'a donc pas de poids statistique sur la variabilité de notre jeu de données.

L'indicateur Lamina Baits (qui estime l'activité de la mésofaune du sol) semble également mal représenté sur le plan factoriel même s'il est plus proche de l'axe 1, il est tout de même proche du centre. Il aura donc un poids statistique sur la variabilité du jeu de données légèrement plus marqué que l'humidité relative par exemple.

Le pH du sol est isolé sur cette représentation, il est donc indépendant de bon nombre de variables excepté celles dont il est l'opposé, comme le POXC ou l'azote total. Des variables opposées sur l'ACP correspond à une corrélation mais négatives entre deux variables.

Toujours sans considérer les groupes de variables, on remarque que plusieurs indicateurs sont proches de l'axe 1. C'est assez positif car cela traduit que l'axe 1 explique (statistiquement) la majorité des variables de notre jeu de donnée, et qui plus est, des indicateurs « Biofunctool ». Les variables VESS (évaluation visuelle de la structure), Stabilité des agrégats et SituResp (respiration basale du sol) sont corrélées d'après cette ACP. Il en va de même pour l'extraction totale d'azote par KCl et les quantités d'anions captées avec les membranes échangeuses d'ions ou pour le Beerkan (vitesse d'infiltration de l'eau dans le sol) et les quantités de cations captées par les membranes échangeuses d'ions.

On considère maintenant les groupes de variable. On ne constate qu'aucun des indicateurs faisant partis du même groupe de variable sont groupés. Certains indicateurs sont proches mais il y toujours un indicateur qui est indépendant des deux autres. Pour le groupe « Maintien de la structure du sol » (les ovales bleues), l'indicateur VESS et la stabilité des agrégats sont proches mais le test Beerkan est éloigné. Idem pour le groupe « Cycle des nutriments » avec l'extraction totale d'azote par KCl et la quantité d'azote nitrique captée par les membranes anioniques qui sont proches mais la quantité d'azote ammoniacal captée par les membranes cationiques est indépendantes des deux autres. Pour le groupe « Dynamique du carbone » (les ovales rouges), SituResp semble négativement corrélé avec les Lamina Baits, à vérifier car ils ne sont pas très représentés sur l'ACP. Le test POXC se détache là aussi des autres indicateurs « dynamique du carbone ».

## 2) Différences en fonction des systèmes viticoles des indicateurs « Biofunctool ».

### Boxplots des indicateurs « Biofunctool » en fonction des systèmes viticoles et des blocs (trois répétitions de chaque système)

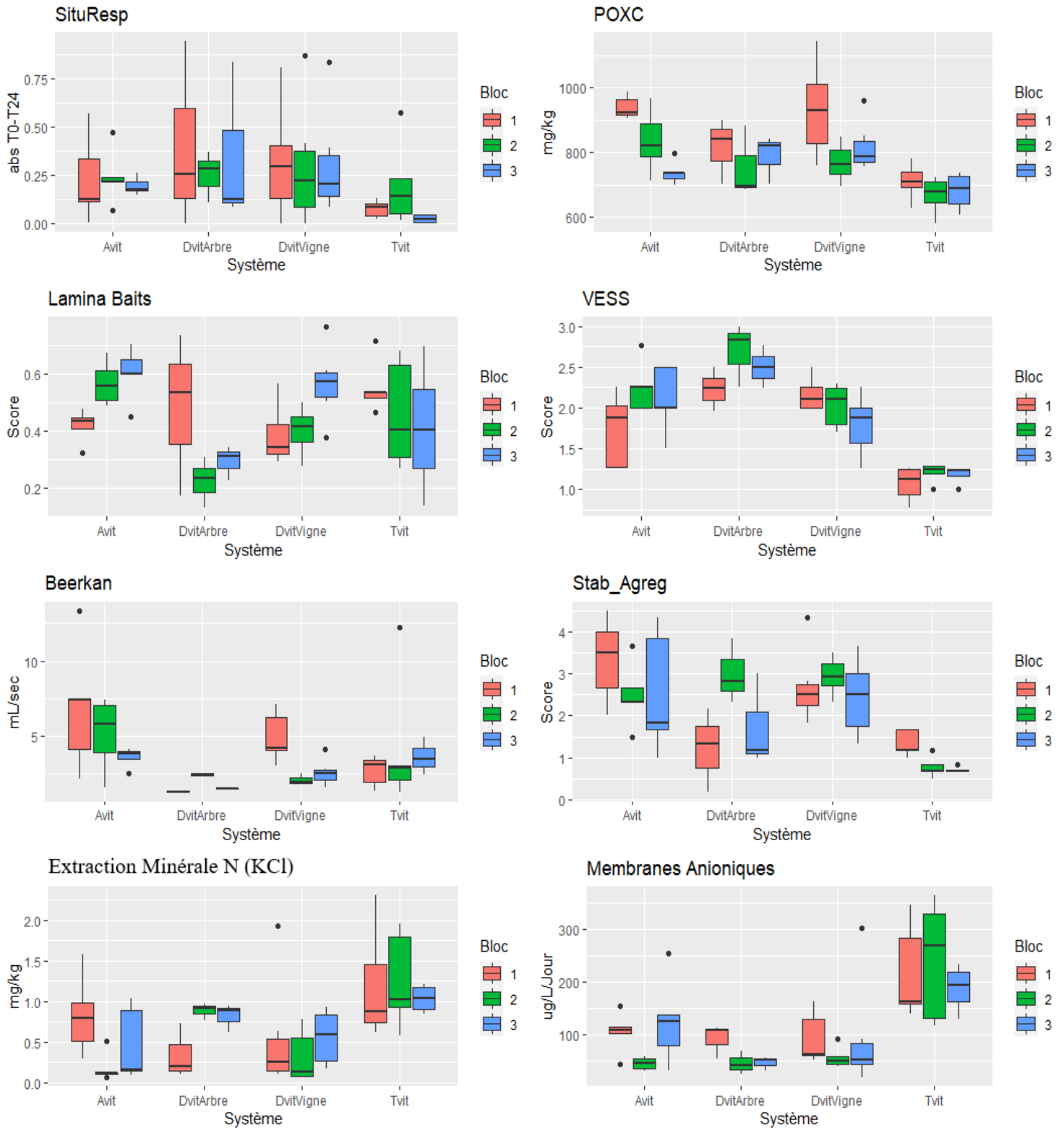


Figure 12 : Boxplots des 9 indicateurs « Biofunctool » en fonction des systèmes (en abscisse) et des blocs. La couleur rouge est attribuée pour le bloc 1, le bleu pour le bloc 2 et le vert pour le bloc 3.

Sur la figure 12, Dvit « Vigne » et « Arbre » ont été séparés afin de voir si des différences existent au sein du système Dvit. Cela est tout à fait possible car l'inter-rang qui accueille les placettes « DvitArbre » est encadré par deux rangées d'arbre et sans vigne à proximité (cf schéma du dispositif Dvit).

Sur l'axe des abscisses est représentés les 4 systèmes agronomiques. En axe des ordonnées sera indiqué l'unité de l'indicateur. Cette unité peut-être soit un score (pour VESS, Stabilité des agrégats ou Lamina Baits), une différence (pour SituResp) ou une unité type mg/kg, ug/L/Jour ou mL/sec (pour l'extraction de l'azote totale par KCl, POXC, Membranes anioniques ou Beerkan).

L'indicateur membrane cationique censé capter l'azote ammoniacal du sol a été retiré car les valeurs étaient quasi-nulles indépendamment des systèmes ou des blocs. Cela justifie certainement sa mauvaise représentation sur le plan factoriel sur le test ACP précédent (figure 11).

	Avit	DvitArbre	DvitVigne	Tvit
SituResp	0,22 +/- (0,10) <b>ab</b>	0,33 +/- (0,25) <b>b</b>	0,31 +/- (0,22) <b>b</b>	0,11 +/- (0,09) <b>a</b>
POXC	837,2 +/- (91,51) <b>a</b>	786,7 +/- (78,9) <b>ab</b>	839,9 +/- (89,4) <b>a</b>	686,4 +/- (46,4) <b>b</b>
Lamina Baits	0,53 +/- (0,09) <b>a</b>	0,33 +/- (0,14) <b>b</b>	0,45 +/- (0,10) <b>ab</b>	0,48 +/- (0,14) <b>ab</b>
VESS	2,03 +/- (0,31) <b>a</b>	2,48 +/- (0,27) <b>b</b>	1,99 +/- (0,23) <b>a</b>	1,15 +/- (0,13) <b>c</b>
Beerkan	5,35 +/- (2,44) <b>a</b>	1,81 +/- (0,51) <b>b</b>	3,17 +/- (1,24) <b>ab</b>	3,53 +/- (1,58) <b>ab</b>
Stab_Agreg	2,79 +/- (0,95) <b>a</b>	1,98 +/- (0,95) <b>a</b>	2,69 +/- (0,57) <b>a</b>	0,95 +/- (0,3) <b>b</b>
Extraction N (KCl)	0,53 +/- (0,41) <b>a</b>	0,72 +/- (0,27) <b>ab</b>	0,52 +/- (0,38) <b>a</b>	1,21 +/- (0,4) <b>b</b>
Membranes anioniques	91,3 +/- (47,46) <b>a</b>	60,77 +/- (23,57) <b>a</b>	79,74 +/- (44,2) <b>a</b>	217,66 +/- (73,71) <b>b</b>

Tableau 5 : Tableau des moyennes et des écart-types pour chaque indicateur et en fonction des systèmes. La significativité des tests statistiques est annotée par des lettres. Des lettres identiques signifient l'absence de différence significative entre deux systèmes pour un indicateur. Des lettres différentes confirment la significativité du test statistique.

Sur le tableau 5, on peut voir les moyennes, les écart-types et les différences significatives (légendées par des lettres en gras) en fonction des systèmes pour les indicateurs représentés sur la figure 12.

#### a) SituResp

Le système Tvit possède des scores moins élevés que les autres systèmes et surtout une variabilité intra-système moins marqué. Tvit a un score moyen de 0.11 contre 0.33 et 0.31 pour DvitArbre et DvitVigne. Avit a un score moyen 2 fois supérieur à Tvit mais ne présente pas de différence significative.

#### b) POXC

La quantité moyenne de carbone labile du sol (POXC) des systèmes Avit et DvitVigne (873.2 et 839.9 mg/kg de sol) sont supérieures au système Tvit (686.4 mg/kg de sol). Le système DvitArbre semble également supérieur à Tvit sur la figure 12 et la p-value est très proche d'être validée (p-value = 0.08). On note également que ce système DvitArbre ne diffère pas de Avit

et DvitVigne et possède le même ordre de grandeur pour les quantités de POXC, qui sont pourtant différents significativement de Tvit. De plus, on remarque que le bloc 1 (rouge) possède pour tous les systèmes agrécologiques des valeurs plus importantes de POXC.

#### **c) Lamina Baits**

L'activité de la mésofaune du sol (Lamina Baits) est plus importante pour le système Avit (score de 0.53) que pour DvitArbre (score de 0.33). DvitArbre semble également plus faible que Tvit et DvitVigne si l'on regarde uniquement les scores du bloc 2 et 3. Le bloc 1 de DvitArbre semble compenser son déficit avec les autres systèmes et ne permet pas d'être significativement différent selon les p-value.

Pour le test VESS (évaluation visuelle de la structure du sol), les scores du systèmes Tvit (score de 1.15) sont significativement moins élevés que les scores des autres systèmes. Les scores des systèmes Avit et DvitVigne (plus élevés que Tvit) sont approximativement semblables (score de 2.03 et 1.99) mais diffèrent de DvitArbre, qui possède les scores les plus élevés (score de 2.48).

#### **d) Beerkan**

La capacité d'infiltration du sol (Beerkan) du système Avit (de 5.35 mL/seconde) est plus importante que DvitArbre (de 1.81 mL/seconde). DvitArbre possède aussi une faible variabilité de cette infiltration en fonction du bloc. Statistiquement, pas de différence significative entre DvitArbre et les deux autres systèmes DvitVigne et Tvit. Le bloc 1 du système DvitVigne semble se détacher et plus élevé que les autres blocs de ce système.

#### **e) Stabilité des agrégats**

Que ce soit sur la figure 12 ou d'après la p-value, les scores de stabilité des agrégats sont moins élevés pour le système Tvit par rapport à tous les autres systèmes. Le score moyen de Tvit est de 0.95 alors que Avit de 2.79, DvitArbre est de 1.98 ou DvitVigne de 2.69.

#### **f) Extraction d'azote minérale au KCl**

La quantité moyenne d'azote minéral extraite au KCl est supérieure pour le système Tvit (1.21 mg/kg de sol) que Avit (0.53 mg/kg) et que DvitVigne (0.52 mg/kg de sol). Le système DvitArbre paraît également plus faible que Tvit mais son bloc 2 et 3 ont des quantités d'azote plus importantes que le bloc 1, statistiquement la p-value n'est pas significative de 0.03.

#### **g) Membrane anionique**

Enfin, la quantité d'azote nitrique captée par les membranes anioniques est plus élevée pour le système Tvit que les autres systèmes. Les membranes Tvit ont capté en moyenne 217.66 ug/L/jour contre environ 60 à 90 ug/L/jour pour les autres systèmes. De plus, sur le boxplot, les systèmes Avit, DvitVigne et DvitArbre sont très semblables en termes de répartition, de gamme de valeur et de position des blocs au sein des systèmes. Pour rappel, l'unité ici est en ug/L/jour car les litres correspondent à la solution issue de l'extraction au KCl dans laquelle nous avons secoué les membranes pour extraire l'azote captée.

Les tests statistiques (annexe 1) mettent en évidence les différences significatives suivantes :

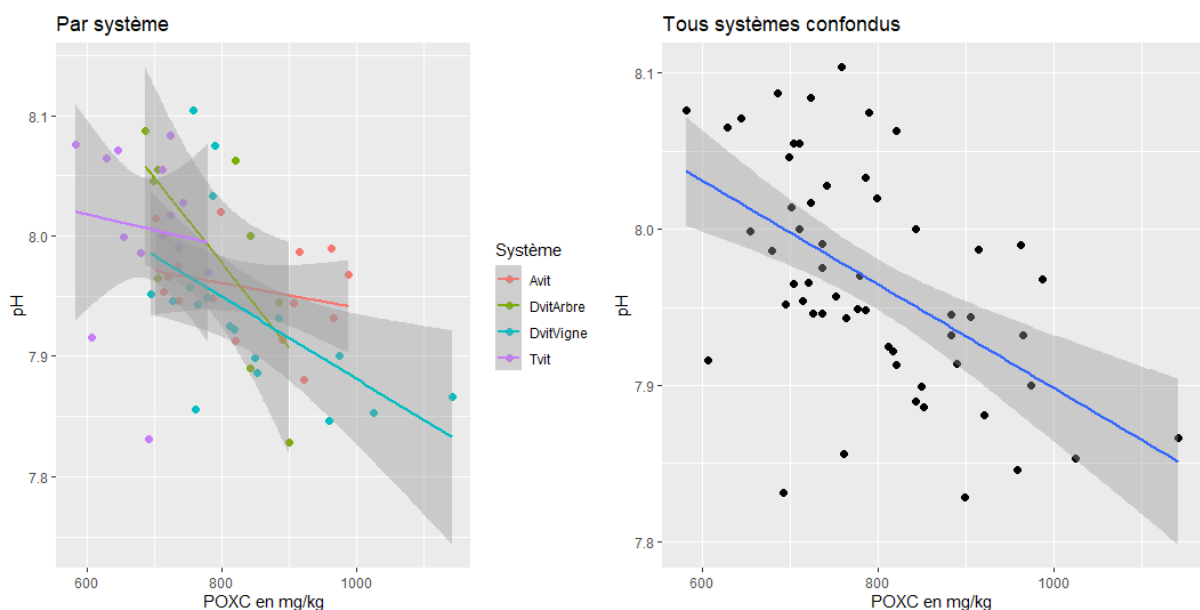
- Concernant l'indicateur POXC, il existe une différence significative entre le bloc 1 et 2 pour les systèmes Avit et DvitVigne. On peut voir que le bloc 1 pour les deux systèmes possède des valeurs POXC supérieures au bloc 2.
- Les scores des Lamina Baits sont différents entre le bloc 1 et 2 pour le système Avit et DvitArbre. Cette fois le bloc 1 possède des scores moins élevés par rapport au bloc 2 de ces deux systèmes. Autre différence significative, c'est entre le bloc 1 et 3 pour, encore une fois, le système DvitVigne. Le bloc 3 a des meilleurs scores par rapport au bloc 1.
- Pour le test Beerkan, c'est toujours le bloc 1 qui diffère des autres blocs sur le système Avit, DvitArbre et DvitVigne. Pour DvitArbre, le bloc 1 a des quantités d'infiltration du sol (mL/sec) moins élevées que le bloc 2 et 3. C'est l'inverse pour DvitVigne, car le bloc 1 possède des quantités d'infiltration du sol plus importantes que le bloc 2 et 3.
- Pour finir, les p-value des stabilités des agrégats mettent en évidence une différence significative entre les blocs du système Tvit. Le bloc 1 diffère des bloc 2 et 3 et possède des meilleurs scores.

On a donc des influences ponctuelles des blocs au sein de nos systèmes pour certains indicateurs. On remarque que pour les systèmes Avit et Dvit que le bloc 1 est souvent concerné dans ces différences significatives. Pour le système Tvit, seul l'indicateur stabilité des agrégats semble avoir des différences en fonction des blocs.

### 3) Modification du pH du sol en fonction des pratiques agricoles ?

« Biofunctool » via ses 9 indicateurs permet d'estimer la qualité d'un sol mais peut-on coupler ces indicateurs avec d'autres analyses qui ne sont pas réalisées dans le protocole de « Biofunctool » ? Les indicateurs « Biofunctool » répondent-ils aux liens connus entre différentes variables du sol ?

#### Nuage de point et régression linéaire du POXC en fonction du pH



	Avit	DvitArbre	DvitVigne	Tvit	Systèmes confondus
Coefficient de corrélation POXC~pH	-0,2745	-0,6765	-0,5483	-0,1061	-0,5307

Figure 13 : Régression linéaire entre les mesures de POXC et le pH du sol. Un tableau avec les coefficients de corrélation (Pearson) pour chaque système est associé.

Sur la figure ci-dessus, on observe des nuages de points en fonction de la quantité de carbone labile mesurée en mg/kg de sol avec la méthode POXC et les valeurs de pH associées. Sur le graphique de gauche de la figure 13, chaque système est représenté avec une couleur différente et accompagné de leur droite de régression linéaire respective. Le graphique de droite, c'est l'ensemble des mesures POXC et pH sans dissocier les systèmes. Le tableau correspond au coefficient de corrélation pour chaque système et tous systèmes confondus calculé avec la méthode de Pearson.

Tout d'abord, on constate que toutes les relations entre POXC et pH sont négatives et ceux quel que soit le système.

Les nuages de points sont plus ou moins étendus selon les systèmes. En effet, le système Tvit (en violet) possède des valeurs de POXC allant de 600 à moins de 800 mg/kg de sol contre 700 à plus de 1100 mg/kg pour le système DvitVigne. Idem pour les valeurs de pH, certains systèmes possèdent des gammes de pH restreintes tandis que d'autre plus large. Le système Avit et Tvit (si on ignore le point le plus entouré en rouge sur le graphique) ont respectivement des pH entre 7.85 - 8 et 7.9 – 8.07 tandis que les 2 autres systèmes (DvitVigne et DvitArbre) ont des pH compris entre 7.8 et 8.1, ces écarts de pH paraissent peu différents mais en proportions cela fait du simple au double.

Les droites de régression linéaire en fonction des systèmes ont des pentes différentes. On remarque le système DvitArbre possède le coefficient de corrélation le plus marqué (-0.68) suivie de DvitVigne (-0.55), puis de Avit (-0.27) et pour finir de Tvit (-0.11). On a donc des corrélations plus ou moins marquées entre POXC et pH en fonction des systèmes. De manière générale, avec tous les systèmes confondus, le coefficient de corrélation est de -0.53 et est assez semblable au système DvitVigne.

#### 4) Suivi de l'évolution des stock azotés. Validation du protocole.

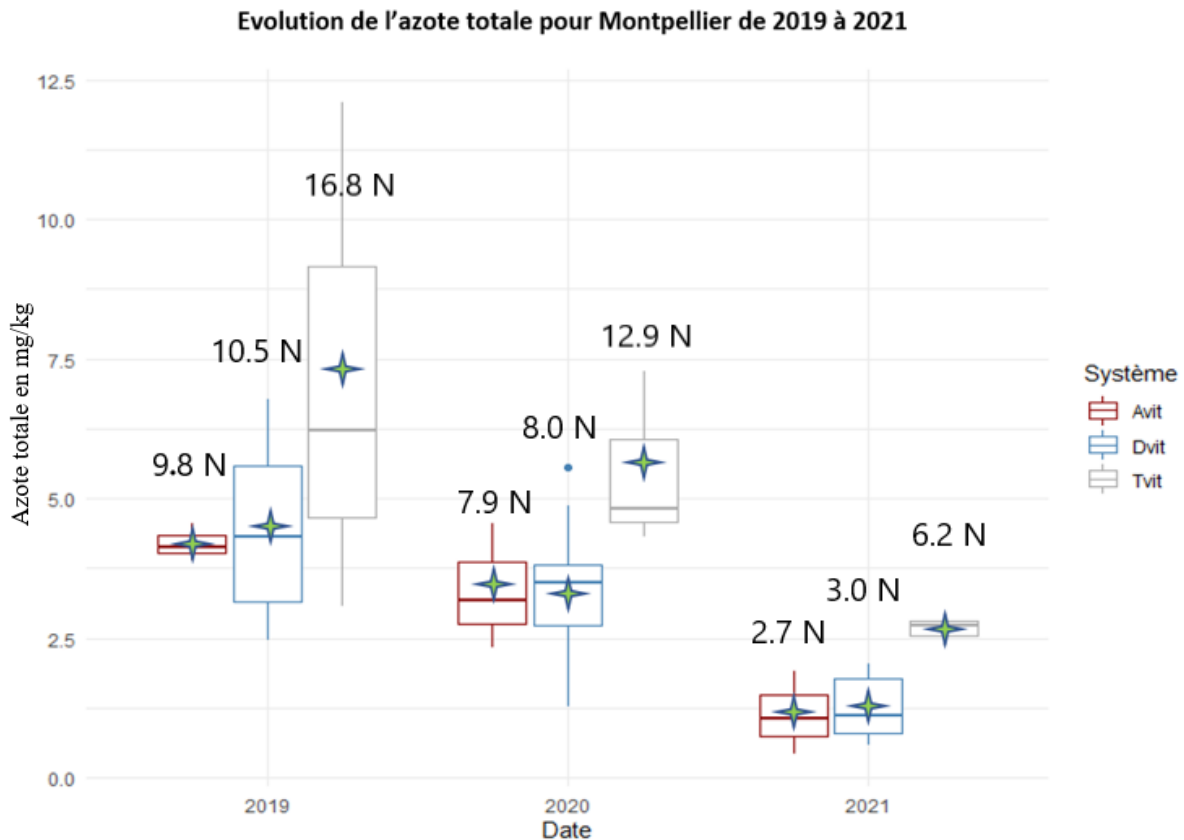


Figure 14 : Évolution du stock d'azote minéral du sol de 2019 à 2020.

Sur la figure 14, on peut voir des mesures d'azote total inorganique du sol sur plusieurs années et en fonction des systèmes (DvitArbre n'a pas été représenté ici) pour le dispositif Salsa de Montpellier. Les étoiles à quatre bras correspondent aux moyennes des boxplots et les nombres au-dessus de chaque boxplot sont les unités azotées rapportées à l'hectare sur 20 cm de profondeur. Depuis le début du projet, des relevés d'azote total sont réalisés afin de suivre l'évolution du stock chaque année et aux mêmes périodes. Les périodes sur lesquelles sont effectuées ces analyses sont à la sortie de l'hiver (Février-Mars) et au début du printemps (Avril-Mai). Les données utilisées pour ce graphique sont celles du début de printemps pour 2019, 2020 et 2021. Les données 2021, correspondent aux valeurs Biofunctool de l'indicateurs « Extraction d'azote minéral par Kcl ». Le protocole utilisé pour cette méthode « biofunctool » est exactement le même que celui utilisé par CelestaLab pour les années 2019 et 2020. Il est donc possible de les comparer.

On constate sur la figure 14, que le stock d'azote total du sol sur 20 cm de profondeur diminue chaque année depuis 2019. Sans considérer les systèmes, le stock d'azote total passe de 5.5 mg/kg de sol en 2019 à 1.77 mg/kg de sol 2021. Deux années après l'implantation du dispositif, le stock a diminué de plus de 3 fois. Pour rappel, avant 2018 l'occupation du sol était de type prairie.

Chaque système diminue de façon plutôt proportionnelle chaque année. En 2 ans, le stock azoté Tvit a diminué de 36% contre 27% pour Avit et 28 % pour Dvit.

La représentation spatiale graphique des systèmes entre eux pour les 3 années d'analyses, donc avec les analyses « biofunctool », sont quasi-similaires, Tvit est toujours supérieur à Dvit qui

est supérieur à Avit. On a donc une décroissance proportionnelle des stocks azotés différentes en fonction des systèmes mais une position des stocks azotés des systèmes entre-eux toujours identiques pour les 3 années. Les données 2021 « biofunctool » semblent suivre la même dynamique et la même organisation spatiale des systèmes que les années 2019 et 2020 de CelestabLab.

## 5) Score « Biofunctool » en fonction des systèmes viticoles.

### Score « Biofunctool » par groupe de variable et par système viticole

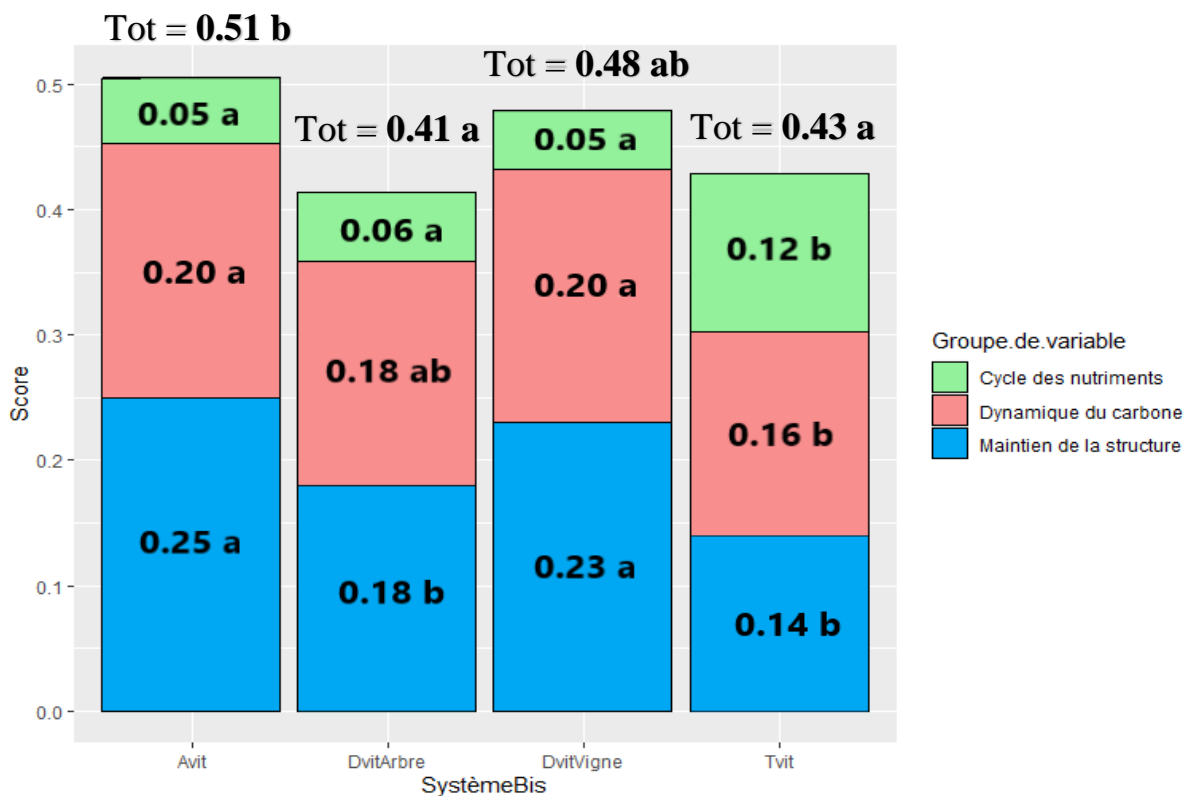


Figure 15 : Histogrammes des indices de qualités par groupes de variables et totaux en fonction des systèmes agricoles.

On peut voir sur la figure 15, des histogrammes qui représentent les scores attribués avec l’outil « Biofunctool » en fonction des groupes de variables et des systèmes viticoles. Il y a trois groupes de variables. Un premier groupe « Dynamique du carbone » prend en compte les indicateurs POXC, Lamina Baits et SituResp. Un deuxième groupe « Cycle des nutriments » qui comprend les scores et valeurs des indicateurs d’extraction d’azote totale par KCl et les membranes anioniques et enfin un troisième, et dernier groupe « Maintien de la structure » avec les indicateurs Beerkan, Stabilité des agrégats et VESS.

Sur cette figure 15, on constate que les scores pour le groupe « Maintien de la structure » sont plus élevés pour les systèmes Avit et DvitVigne que pour le Témoin ou DvitArbre. Les scores de Tvit et DvitArbre sont respectivement 0.14 et 0.18 tandis que Avit est de 0.25 et DvitVigne de 0.23. Ces systèmes sont presque près de 2 fois supérieurs à celui de Tvit ou DvitArbre. Les scores de « Dynamique du carbone » sont plus élevés pour le système Avit et DvitVigne que le système Tvit. DvitArbre ne diffère pas significativement de tous les systèmes.



Pour les scores du Cycle des nutriments, on remarque que le système Tvit possède un meilleur score (0.12) que les systèmes Avit (0.05) ou DvitArbre (0.06) et DvitVigne (0.05), soit plus du double des systèmes agroécologiques.

On a donc les scores des trois groupes de variables du système Tvit qui diffère significativement systématiquement d'au moins deux systèmes agroécologiques.

Le système Avit possède le meilleur score global avec 0.51 suivi de DvitVigne, Tvit et en dernière position DvitArbre avec respectivement 0.48, 0.43 et 0.41. Le système Avit et DvitVigne ont significativement des scores globaux plus élevés que Tvit et DvitArbre.

## Discussions

Cette partie « discussion » reprendra les sous-parties de la partie précédente « résultats » en suivant le même ordre afin de procéder à leurs interprétations. Une critique sera réalisée sur les protocoles des différents indicateurs « Biofunctool » et sur l'information qu'ils renseignent. Une prospection pourra être faite sur la position que peut prendre « Biofunctool » d'un point de vue d'une expertise agronomique et pédologique.

### **1) Dispersion statistique des variables et indicateurs « Biofunctool ».**

Sur la représentation ACP (figure 11), les variables C/N, Carbone total par CHN ne semblent pas avoir de lien statistique avec POXC et N total par CHN. Le ratio C/N mesuré avec la même méthode (CHN) et impliquant les deux variables C total et N totale devraient être fortement liées. Cela peut se traduire par une forte implication des quantités de Carbone dans le ratio C/N et que les stocks N totale sont homogènes spatialement sur le dispositif expérimental. De plus, le C total par CHN ne semble pas lié avec l'indicateur POXC alors que ces variables par définition sont dépendantes car elles mesurent toutes les deux les quantités de carbone mais dans des compartiments du sol différents. Le carbone labile (ou dit « actif ») du sol mesuré par le POXC ne participe que très faiblement au stock de carbone total du sol du dispositif. On distingue trois compartiments de matière organique carbonée dans les sols, en fonction de leur vitesse de dégradation : un labile (dégradation de la MO sur des échelles de temps allant de la journée à l'année), un intermédiaire (décomposition en années voire décennies) et un stable (renouvellement en plusieurs décennies à plusieurs siècles) (Balesdent et Recous., 1997). Le carbone total du sol doit être majoritairement composé de carbone dit « intermédiaire » ou « stable » ayant déjà subi des processus de minéralisation et dans des compartiments plus stables que ceux mesurés via le POXC. D'ailleurs, l'augmentation du stock de carbone total du sol évolue lentement au cours du temps après un changement d'occupation du sol (Eldon et Gershenson., 2015 ; Arrouays et al., 2002). Le dispositif expérimental est en place depuis 3 ans, c'est encore assez tôt pour constater l'effet des systèmes agronomiques sur ce stock de carbone total.

On peut également penser que d'après la corrélation positive qui semble exister entre POXC et N par CHN, le compartiment impliqué majoritairement dans le stock d'azote total de nos sols est le même que le compartiment de carbone mesuré par le POXC. C'est-à-dire un compartiment assez récent issu d'apport en matière organique récemment déposée et incorporée au sol. Cependant, N total mesuré par CHN et extrait au KCl ne sont pas corrélés alors que ces analyses mesurent les quantités du même élément. L'extraction de l'azote par KCl permet une extraction quantitative de l'azote inorganique nitrique et ammoniacal (Keeney et Nelson.,

1983). L'absence de corrélation entre ces deux variables conforte donc l'idée que l'azote mesurée par CHN est majoritairement sous forme organique.

Il est intéressant de constater que le pH et le POXC sont négativement corrélés. Une augmentation des quantités de carbone labile du sol acidifie-t-elle le sol ? Des relations existent entre la proportion de matière organique du sol et son complexe argilo-humique, sa capacité d'échange cationique et son pH (Ciesielski et al., 2008).

En s'intéressant aux groupes de variables, on ne constate qu'aucun des groupes de variables n'a tous ses indicateurs groupés. Cela est problématique car les indicateurs faisant parties du même groupe vont de paires et une augmentation des scores ou valeurs de l'un devrait être suivi d'une même réponse. Or, on peut voir par exemple pour le groupe « Dynamique du carbone » que les trois indicateurs (SituResp, LaminaBaits et POXC) sont assez éloignés sur l'ACP et ne présentent pas de lien statistique très marqué dans l'attribution des scores. De plus, Lamina Baits qui mesure l'activité de la mésofaune du sol et SituResp qui évalue la respiration basale du sol semblent négativement corrélés. Cela pourrait poser un problème dans l'élaboration nos indices de qualité car si les valeurs ou scores d'une des variables du même groupe augmente et qu'une autre diminue, par différence les indices de qualité du groupe de variable s'équilibreront au lieu de se cumuler. D'ailleurs, cette relation négative entre Lamina Baits et SituResp devrait être plutôt positive quand on connaît les relations à tendance coopérative entre mésofaune et activité microbiologique du sol (Ponge., 2000).

Les autres groupes de variables « Cycle des nutriments » et « Maintien de la structure » possèdent 2 indicateurs positivement liés statistiquement mais 1 indicateur se détache systématiquement des autres (respectivement membrane cationique et Beerkan). Pour le « Cycle des nutriments », l'indicateurs membrane cationique ne possède aucune corrélation avec les indicateurs membrane anionique et l'extraction d'azote totale par KCl. Cela s'explique par le fait que les quantités d'azote ammoniacal captées par les membranes cationiques étaient très faibles voir quasi-nulles pour beaucoup de point d'échantillonnage. L'azote totale inorganique extraite au KCl est constituée majoritairement d'azote nitrique, d'où leurs proximités sur l'ACP.

Le groupe « Maintien de la structure », qui s'appuie sur trois indicateurs qui évaluent la stabilité et la résistance des agrégats, la structure et la capacité d'infiltration du sol, a une corrélation entre la stabilité des agrégats et la structure visuelle du sol mais pas avec l'infiltration. Les trois indicateurs « Maintien de la structure » sont normalement intimement liés. La capacité d'infiltration du sol dépend notamment de la texture, de la porosité, (de son humidité pour des sols saturables, ce qui n'est pas le cas ici), de l'occupation du sol et du travail du sol (Lipiec et al., 2006). Le Test VESS qui évalue visuellement la structure du sol, où deux des critères importants dans l'attribution du score sont la compaction du sol et la difficulté à casser manuellement des agrégats, est logiquement corrélé avec la stabilité des agrégats. L'effet mesuré par ces deux indicateurs sera principalement la présence ou l'absence du travail du sol des systèmes viticoles. En revanche, la capacité d'infiltration du sol, sur la profondeur pris en compte par le test Beerkan, ne verra peut-être pas de différence entre un système avec un travail du sol (et une macroporosité prédominante) ou un sol avec des couverts végétaux (qui ont pour objectif, entre autres, d'améliorer via les systèmes racinaires l'infiltration).

Il semblerait que les stocks totaux de carbone et d'azote des sols soient majoritairement constitués de compartiments différents. Le carbone labile représente une faible contribution dans le stock de carbone total alors que le stock total d'azote semble constitué principalement d'azote organique labile.

La représentation des groupes de variables qui incluent chacun 3 indicateurs ne sont pas toujours liés sur le plan factoriel de l'ACP alors qu'ils sont censés, au sein du même groupe, être dépendants.

## **2) Différences en fonction des systèmes viticoles des indicateurs « Biofunctool ».**

### **a) SituResp**

La respiration du sol (SituResp) représente l'activité biologique du sol. La plupart des transformations d'intérêt agronomique dans le sol sont d'origine biochimique. Leur déroulement est conditionné par la présence d'êtres vivants et par leurs activités enzymatiques qui dégradent et transforment en composés chimiques assimilables par les plantes notamment les matières organiques et/ou minérales. Avec une activité biologique plus importante pour les systèmes DvitArbre et DvitVigne par rapport à Tvit, les matières organiques et éléments nutritifs du sol sont transformés et minéralisés de manière plus efficace pour ses systèmes agroécologiques. Avit possède également une respiration basale moyenne du sol plus élevée que Tvit même si aucune différence significative n'existe entre ces deux systèmes. Cependant, une transformation des matières organiques du sol efficace et complète nécessite l'intervention de beaucoup d'espèces bactériennes ou fongiques (Pascault., 2010). Une analyse sur la biomasse et la richesse spécifique microbienne permettrait d'évaluer l'état de l'écosystème « sol » et les fonctions écosystémiques rendues de la faune microbienne pour les cultures (Plassart et al., 2019).

Les systèmes sans travail du sol, aucun intrant phytosanitaire (néfaste à la faune microbiologique du sol (Pascault., 2010)) et avec l'implantation de couverts végétaux spontanés ou semés, ont des activités microbiologiques du sol plus élevés qu'un système viticole « conventionnel ».

### **b) POXC**

La quantité de carbone labile du sol (POXC) est plus importante pour les systèmes Avit et DvitVigne (qui sont similaires en termes d'itinéraire technique et d'occupation du sol) que pour le système Tvit. Les couverts semés présents sur les systèmes agroécologiques ont donc un effet positif sur la quantité de carbone labile du sol vis-à-vis du système Témoin sans couvert et avec travail du sol. Le système DvitArbre possède une différence presque significative ( $p$ -value=0.08) avec Tvit et on pourrait penser que la présence d'un couvert spontané soit également plus prédisposée à augmenter le carbone labile du sol. Les systèmes avec des couverts semés ont des quantités moyennes plus élevées que le système avec des couverts spontanés. Ces résultats « Biofunctool » convergent dans la même conclusion que des publications qui confirment l'importance du choix d'espèce et de la conduite du couvert (date de semis, date de tonte...) pour améliorer plus efficacement des paramètres du sol comme les quantités de carbone labile (Adetunji et al., 2020). On note qu'au sein de ces systèmes Avit et DvitVigne le bloc 1 est significativement supérieur au bloc 2 et 3. La différence significative qui existe entre Tvit, Avit et DvitVigne est peut-être expliquée par un bloc 1, pour les systèmes agro-écologiques, qui sur-représente les quantités de carbone labile du sol. Cependant, le système DvitArbre, qui partage les mêmes blocs que Avit et DvitVigne, ne possède pas de différence significative avec le bloc 1. Difficile de dire si ces différences entre systèmes sont induites par un effet bloc intra-système mal représenté ou par l'influence réelle des systèmes.

Tous les systèmes agroécologiques possèdent des quantités de carbone labile supérieures au Témoin.

### **c) Lamina Baits**

La mésofaune joue un rôle fondamental pour la production et l'entretien de l'humus. Certains organismes de la mésofaune du sol peuvent être utilisés comme bioindicateurs. Parmi ceux-ci, la mésofaune, constituée d'organismes dont la taille varie entre 0,1 et 2 mm, participe à la transformation de la matière organique du sol, le cyclage des nutriments des plantes, et l'amélioration des propriétés physiques du sol (Laroche et al., 1993).

Le système Avit, qui présente une consommation supérieure de la cellulose des Lamina Baits de DvitArbre, rend des services écosystémiques vis-à-vis de la dégradation primaire des litières plus performants. Cependant, on ne caractérise pas dans ce score l'abondance et la richesse spécifique de cette mésofaune. Les écosystèmes, celui du sol y compris, nécessitent une biodiversité d'organismes vivants (en l'occurrence la mésofaune) optimale afin que ces services écosystémiques soit efficacement rendus (Gardi et al., 2009). La consommation plus ou moins importante des contenus celluloses ne nous renseigne pas sur la classification qui compose la mésofaune du sol et les fonctions écosystémiques associées potentiellement rendues (bioindication).

Le test Lamina Baits révèle des différences selon les systèmes viticoles sur l'activité de la mésofaune du sol mais il est impossible de définir la qualité de cette mésofaune et les services écosystémiques qu'elle peut rendre (prédation pathogène, dégradation MO, amélioration structure du sol ...)

### **d) VESS**

L'évaluation visuelle de la structure du sol (VESS) montre que le système DvitArbre possède des scores supérieurs aux autres systèmes. Tvit, au contraire, est inférieur aux autres systèmes. Pour la réalisation de l'index de qualité des sols, nous avons défini le score optimal pour cette évaluation à 2 (cf. protocole VESS). Tvit avec une moyenne de 1.15 s'avère être un sol avec une stabilité structurale faible, des horizons peu différenciés sur 20 cm. Typique d'un sol qui subit un travail mécanique qui vient casser les agrégats et mélanger les horizons. De nombreuses études démontrent les effets néfastes du travail du sol sur la micro et macrofaune, sa structure, sa capacité d'infiltration, son tassement sous l'horizon de labour... (Desforges., 1996 ; Kumar et al., 2013 ; Constancias et al., 2014). Le test VESS qui consiste à creuser sur 25 cm de profondeur ne permet pas de constater l'effet d'un tassement sous l'horizon de labour (20cm). On constate néanmoins que les scores donnés aux horizons de surface par rapport à ceux plus profonds pour le système Tvit étaient systématiquement plus faibles. Il semblerait qu'un effet de tassement soit visible pour les horizons plus profonds.

Les systèmes Avit et DvitVigne possèdent des scores de 2.03 et 1.99 soit très proche du score optimal fixé. Ces systèmes ont des agrégats de « bonne » dimension entre 2 et 7 mm et relativement cassables manuellement. La structure des horizons n'est pas très compacte, sans être trop meuble, et sont bien dissociables. L'horizon de surface est colonisé par des systèmes racinaires avec une macro et microporosité dissociées mais est également plus riche en matière organique (horizon A d'incorporation des MO).

Le système DvitArbre, avec un score moyen de 2.48, reste dans des scores acceptables avec des horizons dissociables en fonction de leurs couleurs (estimation MO) et de la présence de système racinaire. Ce qui dégrade son évaluation, selon les critères « Biofunctool », c'est une structure un peu plus compacte avec un microporosité plus présente.

Sur ce test, on constate clairement l'effet du travail du sol versus les couverts semés et spontanés sur la structure du sol. Les systèmes avec des couverts semés possèdent les meilleurs scores moyens pour ce test, c'est-à-dire le score optimal 2.

#### **e) Beerkan**

La capacité d'infiltration du sol (Beerkan) dépend des constituants et de l'arrangement de la porosité du substrat. La capacité d'infiltration du système Avit est supérieure au système DvitArbre. Pour l'évaluation visuelle de la structure (VESS), un des critères d'évaluation était la porosité du sol. On voit que Avit qui possède la meilleure infiltration (5.35 mL/sec) possède le score optimal de 2 pour le test VESS. Au contraire, DvitArbre, possède le score VESS le plus élevé. Les capacités d'infiltrations de Tvit et DvitVigne (3.53 et 3.17 ml/sec) sont à peu près équivalentes pourtant les scores pour le VESS sont significativement différents (1.15 et 1.99). La sensibilité de la capacité d'infiltration pour le test Beerkan est plus marquée pour des scores VESS qui sont supérieurs au score optimal (2). Cela se traduit pour les scores du test VESS supérieurs à 2 par un sol trop compacté et avec une microporosité prédominante. Le test Beerkan, sur les profondeurs de nos mesures, est sensible à la présence majoritaire d'une microporosité du sol. Cependant, pour un score proche de 1 pour le test VESS, qui témoigne d'un sol travaillé, il serait intéressant de mesurer cette infiltration sur des horizons plus profonds afin d'observer l'infiltration des horizons supposés tassés par le labour du sol. Le système témoin bénéficie donc d'avoir sur une profondeur de mesure de 20 cm un sol avec une macroporosité très prononcée en surface, ce qui lui permet d'avoir un potentiel de rétention supérieur, mais qu'en est-il lorsque cette porosité est saturée ? En effet, la quantité maximale d'eau que l'on peut administrer au sol est de 3.3 litres. Ce sol travaillé, et très poreux en surface n'est jamais saturé. Si l'on enfonçait notre tube PVC plus profondément et que l'on réalisait le même protocole, est-ce des réseaux de drainage plus profonds pourraient assurer la continuité de l'infiltration de l'eau dans le sol pour le système Témoin ? La vigne a la capacité d'avoir des enracinements profonds (Morlat et al., 1984), nous n'évaluons donc pas la quantité d'eau potentiellement disponible par infiltration pour l'ensemble du système racinaire de la vigne. La capacité d'infiltration la plus faible observée est pour le système qui possède un couvert spontané. Le système sans couvert avec un travail du sol et les systèmes avec des couverts semés ne sont pas significativement différents sur l'horizon 0-20 cm. Cependant, Avit et ses couverts semés possèdent la meilleure capacité d'infiltration avec 5.35 mL/sec.

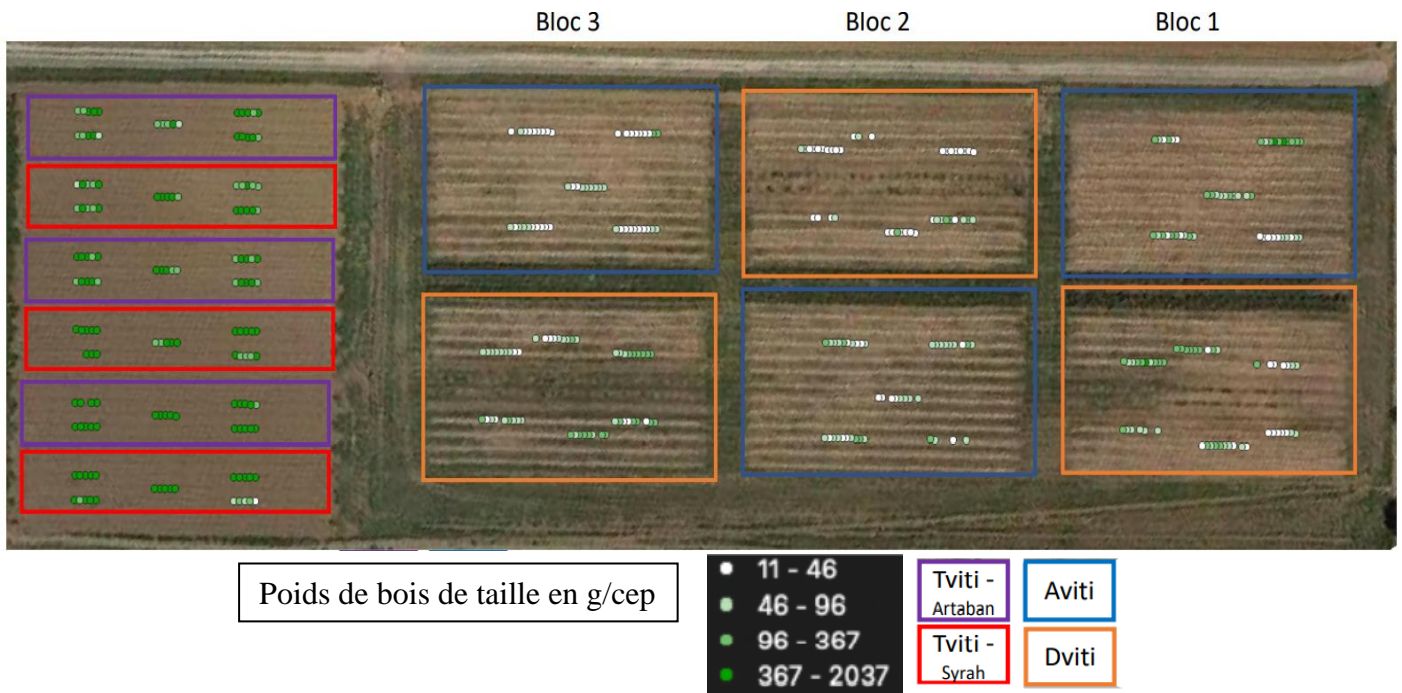
#### **f) Stabilité des agrégats**

Le score moyen de la stabilité des agrégats du système Tvit est moins élevé que les systèmes agroécologiques. Les scores moyens des systèmes agroécologiques sont supérieurs de plus de 2 fois du score de Tvit. Le travail du sol et l'absence de couvert nuisent nettement à la stabilité des agrégats. De plus, les systèmes DvitVigne et Avit, qui ont des couverts sélectionnés et semés en semi-direct, ont tous deux (bien que non-significatif) des scores moyens supérieurs à DvitArbre qui ne possède que des couverts spontanés. Ces scores moyens de stabilité des agrégats ont une augmentation de 25% pour des systèmes avec des couverts sélectionnés (Avit et DvitVigne) par rapport à des couverts spontanés (DvitArbre).

La stabilité des agrégats, pour des sols identiques, est fortement influencé par les pratiques agricoles. Le travail du sol s'avère néfaste pour la résistance des agrégats à l'érosion. Le choix de l'occupation du sol, pour les couverts végétaux, a une influence sur la stabilité des agrégats. Une sélection d'espèce végétale dans l'élaboration des couverts améliore la stabilité des agrégats en comparaison avec un couvert spontané. Un sol avec un couvert végétal sélectionné sera plus résistant à l'érosion.

### g) Extraction minérale de l'azote au KCl

L'extraction d'azote total par KCl met en évidence une augmentation du stock d'azote total pour le système Tviti vis-à-vis des systèmes Aviti et DvitiVigne. Le stock du système Tviti est plus de 2 fois supérieur aux stocks Aviti et DvitiVigne. Malgré la présence de couvert pour créer des retours organiques au sol, les systèmes agroécologiques sont loin du système Témoin. Deux causes sont identifiables, la première ce sont les amendements azotés dont Tviti bénéficie afin de combler les faibles apports normalement issus de litière et subvenir aux besoins nutritifs pour le développement de la vigne. La deuxième, c'est la consommation de l'azote du sol par le couvert pour les systèmes agroécologiques. Bien que le couvert représente une source de MO pour le sol quand il est détruit ou à la fin de son cycle, il consomme aussi l'azote du sol pour se développer. Il faudrait mesurer les quantités d'azote en fin de cycle des couverts et regarder la différence par rapport aux années précédentes pour quantifier l'apport azoté réel du couvert. Le système DvitiArbre, qui possède des couverts spontanés à un stock azoté moyen (non significatif) légèrement supérieur à DvitiVigne et Aviti mais bien inférieur encore du système Témoin. D'ailleurs, si on regarde les poids de bois de taille (carte 9) par cep de 2020 du système Tviti par rapport aux systèmes agroécologiques, on constate qu'ils sont bien supérieurs pour Tviti. Les développements végétatifs des vignes Tviti sont bien plus vigoureux.



Carte 9 : Représentation cartographique des poids de bois de tailles par cep 2020 en fonction des systèmes et des blocs.

On pourrait le confirmer avec un NDVI. Léo Garcia, enseignant-chercheur en agronomie à l'INRAE de Montpellier, veut utiliser un drone capable de capturer des images sur différentes longueurs d'onde pour calculer des NDVI sur des échelles plus fines de l'ordre d'une parcelle agricole par exemple.

### h) Membrane anionique

Même constat que pour l'extraction par KCl avec les résultats des membranes échangeuses d'anions. On constate que le système Tviti possède des quantités d'azote nitrique captées par jour plus de 2 fois supérieures aux systèmes Aviti et DvitiVigne et plus de 3 fois pour DvitiArbre.

Là encore le système témoin par ses amendements azotés et l'unique occupation du sol par les vignes possède un sol beaucoup plus fertile du point de vue azoté. En effet, l'azote est l'un des principaux constituants des acides aminés, des protéines et des acides nucléiques constituant les ADN et l'ARN des végétaux. Une nutrition limitée en azote réduit la synthèse protéique et par conséquent la teneur en chlorophylle. La chlorophylle est un pigment qui intervient dans la photosynthèse pour intercepter l'énergie lumineuse et la transformer en énergie chimique avec l'eau et le dioxyde de carbone. Ce processus bioénergétique est plus performant pour la vigne de Tvit, qui bénéficie d'amendements azotés et d'un stock azoté « exclusivement » réservé à celle-ci.

Globalement, les systèmes Tvit et DvitArbre se différencient des systèmes agroécologiques Avit et DvitVigne sur plusieurs indicateurs « Biofunctool » en présentant généralement un déficit quand il est question d'indicateur étudiant la structure générale du sol (agrégats, infiltration, stabilité structurale) ou l'activité biologique du sol (activité biologique et quantités de carbone labile du sol).

En revanche, pour les indicateurs orientés sur l'étude de l'azote, le système Tvit a un potentiel plus élevé surtout influencé par les amendements azotés apportés.

### **3) Modification du pH du sol en fonction des pratiques agricoles ?**

Les sols carbonatés sont des sols qui ont des pH basiques. L'argile et la matière organique se lient ensemble pour former le complexe argilo-humique (CAH). Celui-ci porte des charges négatives et retient donc à sa surface les cations ou éléments chargés positivement (Gaiffe et al., 1984).

La capacité d'échange cationique (CEC) d'un sol est donc la quantité de cations que celui-ci peut retenir sur son complexe absorbant à un pH donné. Il est préférable que ce soit des acides faibles qui occupent les sites de fixation :  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{K}^{+}$  car ceux-ci sont les plus intéressants d'un point de vue nutritif pour la plante. Les racines des plantes libèrent alors des ions  $\text{H}^{+}$  qui vont prendre la place des éléments nutritifs (Mg, Ca...) sur le complexe argilo-humique. Les éléments nutritifs passent alors dans la phase liquide du sol et peuvent être prélevés par les plantes (Clarkson et Hanson., 1980).

À l'instar des plantes qui libèrent des  $\text{H}^{+}$  pour séparer les cations nutritifs du complexe argilo-humique, le complexe argilo-humique (et sa CEC) assure donc l'effet tampon du pH du sol.

On pourrait penser que plus un sol contient de matière organique plus il aura un complexe argilo-humique possédant des charges négatives avec une capacité d'échange cationique plus importante et un effet tampon sur le pH efficace.

On constate sur la figure 13, la relation négative entre la quantité de carbone labile et le pH. Ce coefficient de corrélation (toujours négatif) est différent en fonction des systèmes viticoles. De manière globale, le coefficient de corrélation (-0.53) montre une décroissance du pH avec une augmentation de la quantité de carbone labile du sol. La relation négative infirme qu'un sol avec une quantité de matière organique plus élevée aura un CAH avec plus de charges négatives et une CEC plus importante et donc un effet tampon du pH plus efficace. Cependant, ces phénomènes pédologiques sont contrastés avec une activité biologique (SituResp) pour les systèmes agroécologiques. En effet, au cours de la consommation/transformation des matières organiques, apportées par les couverts végétaux, l'activité biologique nécessaire à ces transformations acidifie le sol. Le dioxyde de carbone ( $\text{CO}_2$ ) produit dans le sol par l'activité biologique, qu'il s'agisse des racines, des microorganismes ou des autres êtres vivants, réagit avec l'eau pour former de l'acide carbonique ( $\text{H}_2\text{CO}_3$ ) qui se dissocie et libère des ions  $\text{H}^{+}$  :  $\text{CO}_2 + \text{H}_2\text{O} \rightleftharpoons \text{H}_2\text{CO}_3 \rightleftharpoons \text{HCO}_3^- + \text{H}^+$ . L'acidification qui en résulte n'est que temporaire si les

échanges entre le sol et l'atmosphère permettent le dégagement du CO<sub>2</sub>. En revanche, lorsque HCO<sub>3</sub><sup>-</sup> est lixivié avec les cations tels que Ca<sup>2+</sup>, Mg<sup>2+</sup>, K<sup>+</sup> ou Na<sup>+</sup>, elle devient définitive (Gupta et al., 1984).

Avec un enrichissement en matière organique de certains systèmes on observe une diminution du pH du sol induit par une activité biologique plus marquée. Cela se confirme si on regarde les régressions linéaires de chaque système ainsi que les scores moyens de la respiration basale du sol (SituResp). On constate que c'est DvitArbre qui possède le meilleur score SituResp (0.33) et qui a le coefficient de corrélation POXC/pH le plus négatif (-0.68). Le classement des coefficients de corrélation suit l'ordre croissant des scores SituResp. DvitVigne avec un SituResp de 0.31 a un coefficient de corrélation POXC/pH de -0.55 alors que Avit a un SituResp plus faible de 0.22 et un coefficient de corrélation également plus faible de -0.27. Tvit avec le score SituResp le plus bas (de 0.11) possède le coef POXC/pH le moins négatif (-0.11). Une augmentation de l'activité biologique du sol provoque une diminution du pH du sol et donc son acidification. L'abaissement du pH favorise la mobilité des ETM, notamment par mise en solution de sels métalliques ou destruction de la phase de rétention. Un sol avec des pratiques agroécologiques similaires peut-il représenter un risque sur la biodisponibilité des ETMs (Basta et al., 2005) ?

L'influence des pratiques agricoles sur l'activité biologique des sols provoque indirectement l'acidification du sol. Plus l'activité biologique du sol est stimulée plus le sol verra son pH s'acidifié rapidement.

#### **4) Suivi de l'évolution des stocks azotés.**

Au lancement du projet Salsa et à la mise en place des systèmes viticoles, des analyses des caractéristiques physico-chimiques du sol ont été réalisées. CelestaLab, parmi les nombreuses analyses qu'il propose, mesure la quantité d'azote total par l'extraction au KCl. Il s'avère que leur méthode d'extraction d'azote est la même que pour un des indicateurs « Biofunctool ». On peut alors regarder l'évolution des stocks azotés sur 3 années.

Le système Tvit, comme vu précédemment, possède des quantités d'azote total du sol systématiquement supérieures aux systèmes agroécologiques et ceux pour les 3 années. Les stocks azotés de tous les systèmes décroissent proportionnellement chaque année. Pour rappel, avant l'implantation des systèmes viticoles, l'occupation du sol de la parcelle était de type « culture céréalière ». À la suite de l'implantation des systèmes viticoles, on voit clairement un stock azoté qui diminue. Le système Tvit, bien qu'il ait de meilleurs stocks, perd en 2021 36% du stock azoté de départ. Les systèmes agroécologiques sont en-dessous des 30% de pertes. Le système témoin malgré les amendements azotés pour maintenir des stocks plus élevés que les systèmes agroécologiques connaît une décroissance de celui-ci plus sévère. Ce système s'inscrit moins dans une optique d'agriculture durable car les sols s'épuisent plus rapidement. Bien que l'analyse de ces stocks soit sur un horizon de surface (0-10 cm), nous n'avons pas connaissance des ressources azotées que les horizons plus profonds possèdent. La vigne par sa capacité d'enracinement en profondeur bénéficie peut-être que partiellement de ses apports de surface. Sur la carte 9 avec les biomasses des poids de bois de taille, les vignes Tvit via les quantités d'azote disponibles ont des activités photosynthétiques supérieures.

De plus, le fait que les mesures d'azote « Biofunctool » (données 2021) semblent suivre une évolution décroissante « logique » et proportionnelle aux années précédentes (données CelestaLab) valide le respect du protocole « Biofunctool » pour ce test. Il est intéressant de



pouvoir croisé les données « Biofunctool » avec d'autres analyses. Ici les protocoles sont similaires mais on pourrait coupler des données POXC avec des mesures de carbone organique, de carbone total, de taux de matière organique. Il en va de même pour d'autre indicateur, comme les résultats SituResp et une mesure d'émission de CO<sub>2</sub> par Li-cor ou encore les scores Lamina Baits avec la richesse spécifique et les populations de la méso et macrofaune du sol. Ces compléments d'analyses à « Biofunctool » permettraient de vérifier la fiabilité des résultats et d'apporter une expertise plus complète et surtout d'identifier les facteurs sous-jacents impliqués dans l'attribution des résultats de « Biofunctool ».

## **5) Score « Biofunctool » en fonction des systèmes viticoles.**

Les indices de qualité globaux des sols montrent des différences en fonction des systèmes. Le système Avit possède le meilleur score global (0.51) suivi de DvitVigne (0.48). Les systèmes Tvit (0.43) et DvitArbre (0.41) présentent, d'après « Biofunctool », une qualité de sol inférieure au système Avit et DvitVigne. Bilan pas si négatif pour Tvit car son indice de qualité se positionne légèrement au-dessus du système DvitArbre. Tvit améliore son indice notamment grâce à des scores bien meilleurs pour les indicateurs mesurant les quantités d'azote.

En s'intéressant aux indices de qualité par groupe de variable, on remarque que DvitArbre possède des scores moins élevés que les autres systèmes agroécologiques pour les groupes « dynamique du carbone » et « Maintien de la structure ». Les couverts spontanés de ce système lui confèrent un apport de litière et de matière organique plus faible, une stabilité des agrégats moins prononcée et une structure du sol plus compact (au-dessus du score optimal pour VESS) que les systèmes avec des couverts semés et sélectionnés. La sélection des couverts est donc bénéfique pour les qualités physiques et la dynamique du carbone du sol. Le système Tvit possède lui aussi des scores pour les qualités physiques et de dynamique du carbone plus faible que les systèmes agroécologiques. Cependant, ses très bons scores pour le groupe « cycle des nutriments » lui permettent de combler le déficit accumulé sur les deux autres groupes de variable et de dépasser finalement le système DvitArbre pour l'indice de qualité total. Pour « Biofunctool », le système Tvit a alors un sol de meilleure qualité que le système DvitArbre qui présente pourtant moins de perturbations et de stress dû aux pratiques agricoles sur le sol.

L'attribution des indices de qualité est critiquable car en normalisant et agrégeant les indicateurs « Biofunctool » en un score entre 0 et 1 et en le multipliant à la contribution respective de ses indicateurs selon une analyse multivariée de type ACP. On apporte plus d'importance à un indicateur par rapport à son poids statistique sur le jeu de données que sur des objectifs agronomiques à atteindre en fonction de la problématique posée. En effet, dans la gestion d'un sol, plusieurs problématiques peuvent-être choisies. On peut vouloir améliorer la fertilité du sol, le stockage du carbone, limiter l'érosion du sol, adopter des pratiques plus respectueuses de l'environnement, ... Dans son calcul d'indice total, Biofunctool ne tient pas compte des enjeux agronomiques que l'on pourrait vouloir atteindre.

Les indices de qualité globaux semblent moins pertinents que de comparer les indices des groupes de variables ou les scores/valeurs des indicateurs séparément en fonction des systèmes agricoles. Dans notre cas, l'indice de qualité du système Témoin est plus élevé que les systèmes agroécologiques avec un couvert spontané alors qu'il possède pour presque tous les indicateurs (exceptés les indicateurs pour l'azote) des déficits significatifs avec les systèmes agroécologiques. Ces indices de qualité total, sans le détail des indicateurs, n'ont aucune valeur agronomique pour comparer des systèmes.

## Conclusion / Perspective

Biofunctool s'avère être une méthode d'évaluation multifactorielle des sols. L'intérêt de cette méthode est de pouvoir estimer l'impact de pratiques agricoles ou de divers agroécosystèmes sur le fonctionnement des sols. Les résultats du dispositif Salsa de l'UMR ABSys sur le Domaine du Chapitre montrent un système Témoin, dont les principales différences avec les systèmes agroécologiques sont l'absence de couvert, un travail du sol et l'usage d'amendement, avec des scores/valeurs moins élevés pour les indicateurs évaluant les caractéristiques physiques ainsi que pour l'activité biologique et les quantités de carbone labile du sol. En revanche ce système Témoin, possède des résultats plus élevés pour les indicateurs qui concernent les quantités d'azote dans le sol.

Biofunctool s'avère tout de même limité à une comparaison entre systèmes agronomiques par manque de référentiel qui permettraient d'avoir une analyse plus objective et moins relative. Biofunctool devrait être combiné à d'autres méthodes d'évaluation pour mieux comprendre certains mécanismes du sol, identifier les facteurs à l'origine des résultats plus précisément afin de corriger un potentiel mauvais score et surtout pour pouvoir se positionner par rapport à d'autre sol viticole avec des pratiques agricoles et un contexte pédoclimatique similaires. En effet, l'utilisation d'un système référence pour évaluer des différences selon des systèmes viticoles agroécologiques ne suffit pas pour comparer nos résultats à des échelles locales ou régionales. Où sont situés nos scores Biofunctool par rapport aux autres sols viticoles ? Il faut que ce référentiel des résultats Biofunctool soit classés selon le contexte pédoclimatique et la description des pratiques culturales.

Les mesures fonctionnelles sont très fortement liées au degré d'activité de la composante biotique des sols, qui dépend fortement des conditions climatiques (température et humidité du sol notamment), il est important de bien définir une période de mesure qui permette l'expression de cette activité et dans un laps de temps court pour éviter des biais météorologiques ou saisonniers.

Dans la sélection des indicateurs, les critères liés à la facilité d'emploi par des non spécialistes de terrain et le faible coût sont des critères avancés pour promouvoir Biofunctool. Cependant, des limites semblent se présenter comme celle de disposer d'un laboratoire avec du matériel laborantin de base (verreries de précision, étuve, balance, spectrophotomètre, agitateur...) pour la préparation de certains outils, comme SituResp® (pour mesurer la respiration du sol), les solutions de POXC (mesure du carbone labile) et le chargement des membranes échangeuses d'ions. On peut aussi faire appel à un prestataire pour les analyses et la préparation des solutions chimiques mais le coût sera plus élevé. Il est également important d'avoir des connaissances en statistiques unies et multivariées car si certains protocoles de terrain peuvent être à la portée de tous les utilisateurs, les analyses du jeu de données obtenues pour l'obtention de l'index de qualité du sol nécessitent une bonne connaissance et maîtrise des outils statistiques.

L'indépendance protocolaire des différents indicateurs et l'obtention rapide d'une partie des résultats (1 ou 2 journées) peut permettre d'être un outil pédagogique intéressant pour des étudiants ou des agriculteurs. La méthode semble adéquate pour sensibiliser les utilisateurs à l'importance de la vie des sols sous un angle fonctionnel et facilement compréhensible. L'utilisation des 9 indicateurs peut être complexe et chronophage car une équipe d'au moins 3 personnes est recommandée pour l'acquisition des données. Chacun des 9 outils apporte au moins dans un contexte, une information importante à intégrer dans l'évaluation de la santé des sols. On peut tout de même utiliser des indicateurs séparément de « Biofunctool » pour répondre à une problématique qui ne nécessite pas l'utilisation des 9 indicateurs mais nous ne pourrions pas déterminer d'index de qualité basé sur les trois fonctions clés du sol d'un point de vue agronomique.

Biofunctool a donc sélectionné trois fonctions clefs du sol selon Kibblewhite et al., (2008) mais d'autres fonctions importantes pourraient être prises en compte, comme la régulation des ravageurs (bio contrôle) ou la dynamique des polluants dans les sols. D'après la littérature, il semble qu'il n'existe pour le moment aucun outil ou technique pour caractériser ces fonctions selon les critères de sélection de Biofunctool à savoir la généralité, la facilité d'emploi, le faible coût.

## Bibliographie

- Adetunji, Adewole Tomiwa, Bongani Ncube, Reckson Mulidzi, et Francis Bayo Lewu. 2020. « Management Impact and Benefit of Cover Crops on Soil Quality : A Review ». *Soil and Tillage Research* 204 (octobre) : 104717. <https://doi.org/10.1016/j.still.2020.104717>.
- Agbohessi, Tachégnon Prudencio, Ibrahim Imorou Toko, et Patrick Kestemont. 2012. « État des lieux de la contamination des écosystèmes aquatiques par les pesticides organochlorés dans le Bassin cotonnier béninois ». *Cahiers Agricultures* 21 (1) : 46-56 (1). <https://doi.org/10.1684/agr.2012.0535>.
- Arrouays, Dominique, Jerome Balesdent, J. C. Germon, Pierre-Alain Jayet, Jean-François Soussana, et Pierre Stengel. 2002. « Stocker du carbone dans les sols agricoles de France ? Rapport ». Report, INRA. <https://doi.org/10.15454/wnky-ms73>.
- Balesdent, Jérôme, et Sylvie Recous. 1997. « Les temps de résidence du carbone et le potentiel de stockage de carbone dans quelques sols cultivés français ». *Canadian Journal of Soil Science* 77 (2) : 187-93. <https://doi.org/10.4141/S96-109>.
- Basta, N.T., J.A. Ryan, et R.L. Chaney. 2005. « Trace element chemistry in residual-treated soil: key concepts and metal bioavailability ». *Journal of environmental quality* 34 (1) : 49-63.
- Belfroid, A. C, M van Drunen, M. A Beek, S. M Schrap, C. A. M van Gestel, et B van Hattum. 1998. « Relative Risks of Transformation Products of Pesticides for Aquatic Ecosystems ». *Science of The Total Environment* 222 (3) : 167-83. [https://doi.org/10.1016/S0048-9697\(98\)00298-8](https://doi.org/10.1016/S0048-9697(98)00298-8).
- Bertrand, S, et K Duhem. 2004. « Transferts de produits phytosanitaires dans le lait : éléments de connaissances », 8.
- Cadre, Edith Le, Merveil Kinkondi, Lydie-Stella Koutika, Daniel Epron, et Louis Mareschal. 2018. « Anionic Exchange Membranes, a Promising Tool to Measure Distribution of Soil Nutrients in Tropical Multispecific Plantations ». *Ecological Indicators* 94 (novembre) : 254-56. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2018.06.041>.
- Ciesielski, Henri, Thibault Sterckeman, J. Y. Baliteau, Giovanni Caria, Vladimir Goutiers, et Jean-Pierre Willery. 2008. « Evolution du pH et de la CEC de sols du Nord de la France en fonction des doses de chaulage (CaCO<sub>3</sub>). Influence du carbone organique ». *Etude et Gestion des Sols* 15 (3) : 161.
- Clarkson, D T, et J B Hanson. 1980. « The Mineral Nutrition of Higher Plants ». *Annual Review of Plant Physiology* 31 (1) : 239-98. <https://doi.org/10.1146/annurev.pp.31.060180.001323>.
- Compant, Stephane, et Florence Mathieu. 2016. *Biocontrol of Major Grapevine Diseases : Leading Research*. CABI.
- Constancias, Florentin, Nicolas Chemidlin Prévost-Bouré, Sébastien Terrat, Simon Aussems, Virginie Nowak, Jean-Philippe Guillemin, Aline Bonnotte, et al. 2014. « Microscale Evidence for a High Decrease of Soil Bacterial Density and Diversity by Cropping ». *Agronomy for Sustainable Development* 34 (4) : 831-40. <https://doi.org/10.1007/s13593-013-0204-3>.
- Davie-Martin, Cleo L., Kimberly J. Hageman, Yu-Ping Chin, Valentin Rougé, et Yuki Fujita. 2015. « Influence of Temperature, Relative Humidity, and Soil Properties on the Soil–Air Partitioning of Semivolatile Pesticides : Laboratory Measurements and Predictive Models ». *Environmental Science & Technology* 49 (17) : 10431-39. <https://doi.org/10.1021/acs.est.5b02525>.
- Desforges, Julie. 1996. « Impacts des systèmes de culture sur les communautés lombriciennes ». <https://corpus.ulaval.ca/jspui/handle/20.500.11794/49869>.

- Dubois, Jean-Jacques. 2017. « L'évolution des systèmes agroforestiers en France. Leur rôle en agroécologie ». Text. <http://irevues.inist.fr/pollution-atmospherique>. 1 mai 2017. <http://dx.doi.org/10.4267/pollution-atmospherique.5700>.
- Eldon, Jon, et Alexander Gershenson. 2015. « Effects of Cultivation and Alternative Vineyard Management Practices on Soil Carbon Storage in Diverse Mediterranean Landscapes : A Review of the Literature ». *Agroecology and Sustainable Food Systems* 39 (5) : 516-50. <https://doi.org/10.1080/21683565.2015.1007407>.
- Flury, Markus. 1996. « Experimental Evidence of Transport of Pesticides through Field Soils—A Review ». *Journal of Environmental Quality* 25 (1) : 25-45. <https://doi.org/10.2134/jeq1996.00472425002500010005x>.
- Gaiffe, M., B. Duquet, H. Tavant, Y. Tavant, et S. Bruckert. 1984. « Stabilité biologique et comportement physique d'un complexe argilo-humique placé dans différentes conditions de saturation en calcium ou en potassium ». *Plant and Soil* 77 (2) : 271-84. <https://doi.org/10.1007/BF02182930>.
- Gardi, C., L. Montanarella, D. Arrouays, A. Bispo, P. Lemanceau, C. Jolivet, C. Mulder, et al. 2009. « Soil Biodiversity Monitoring in Europe : Ongoing Activities and Challenges ». *European Journal of Soil Science* 60 (5) : 807-19. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2389.2009.01177.x>.
- Guimarães, R. M. L., B. C. Ball, et C. A. Tormena. 2011. « Improvements in the Visual Evaluation of Soil Structure ». *Soil Use and Management* 27 (3) : 395-403. <https://doi.org/10.1111/j.1475-2743.2011.00354.x>.
- Gupta, R., D. Bhumbra, et I. Abrol. 1984. « EFFECT OF SODICITY, pH, ORGANIC MATTER, AND-CALCIUM CARBONATE ON THE DISPERSION BEHAVIOR OF SOILS ». <https://doi.org/10.1097/00010694-198404000-00006>.
- Herrick, J. E, W. G Whitford, A. G de Soyza, J. W Van Zee, K. M Havstad, C. A Seybold, et M Walton. 2001. « Field Soil Aggregate Stability Kit for Soil Quality and Rangeland Health Evaluations ». *CATENA, Soil aggregation in arid and semi-arid environments*, 44 (1) : 27-35. [https://doi.org/10.1016/S0341-8162\(00\)00173-9](https://doi.org/10.1016/S0341-8162(00)00173-9).
- Karlen, D. L., M. J. Mausbach, J. W. Doran, R. G. Cline, R. F. Harris, et G. E. Schuman. 1997. « Soil Quality : A Concept, Definition, and Framework for Evaluation (A Guest Editorial) ». *Soil Science Society of America Journal* 61 (1) : 4-10. <https://doi.org/10.2136/sssaj1997.03615995006100010001x>.
- Keeney, D. R., et D. W. Nelson. 1983. « Nitrogen—Inorganic Forms ». In *Methods of Soil Analysis*, 643-98. John Wiley & Sons, Ltd. <https://doi.org/10.2134/agronmonogr9.2.2ed.c33>.
- Kibblewhite, M.G, K Ritz, et M.J Swift. 2008. « Soil Health in Agricultural Systems ». *Philosophical Transactions of the Royal Society B : Biological Sciences* 363 (1492) : 685-701. <https://doi.org/10.1098/rstb.2007.2178>.
- Kratz, Werner. 1998. « The Bait-Lamina Test ». *Environmental Science and Pollution Research* 5 (2) : 94-96. <https://doi.org/10.1007/BF02986394>.
- Kumar, Dinesh, Y. S. Shivay, Shiva Dhar, Chitranjan Kumar, et Rajendra Prasad. 2013. « Rhizospheric Flora and the Influence of Agronomic Practices on Them : A Review ». *Proceedings of the National Academy of Sciences, India Section B : Biological Sciences* 83 (1) : 1-14. <https://doi.org/10.1007/s40011-012-0059-4>.
- Larochelle, Louis, Fernand Pagé, Chantal Jeanne Beauchamp, et Gilles Lemieux. 1993. « Rôle de la mésofaune dans la dynamique de transformation de la matière ligneeuse appliquée au sol », décembre. <https://corpus.ulaval.ca/jspui/handle/20.500.11794/7610>.
- Lassabatère, Laurent, Rafaël Angulo-Jaramillo, Jose Miguel Soria, Richard Cuenca, Isabelle Braud, et Randel Haverkamp. 2006. « Beerkan Estimation of Soil Transfer Parameters

- through Infiltration Experiments-BEST ». *Soil Science Society of America Journal* 70 : 521 à 532. <https://doi.org/10.2136/sssaj2005.0026>.
- Lipiec, J., J. Kuś, A. Słowińska-Jurkiewicz, et A. Nosalewicz. 2006. « Soil Porosity and Water Infiltration as Influenced by Tillage Methods ». *Soil and Tillage Research* 89 (2) : 210-20. <https://doi.org/10.1016/j.still.2005.07.012>.
- Matejovic, I. 1993. « Determination of carbon, hydrogen, and nitrogen in soils by automated elemental analysis (dry combustion method) ». *Communications in Soil Science and Plant Analysis* 24 (17-18) : 2213-22. <https://doi.org/10.1080/00103629309368950>.
- McTaggart, I. P., et K. A. Smith. 1993. « Estimation of Potentially Mineralisable Nitrogen in Soil by KCl Extraction ». *Plant and Soil* 157 (2) : 175-84. <https://doi.org/10.1007/BF00011046>.
- Métral, Raphaël, C Chevrier, Yvan Bouisson, N Bals, V Didier, C Enard, et N Fremond. 2018. « DEPHY EXPE EcoViti Arc Méditerranéen : synthèse des résultats 2012-2017 | Ecophytopic ». 2018. <https://ecophytopic.fr/dephy-expe-ecoviti-arc-mediterraneen-synthese-des-resultats-2012-2017>.
- Morlat, Rene, M. Remoué, et P. Pinet. 1984. « Influence de la densité de plantation et du mode d'entretien du sol sur l'enracinement d'un peuplement de vigne planté en sol favorable ». *Agronomie* 4 (5) : 485.
- Multigner, Luc. 2005. « Effets retardés des pesticides sur la santé humaine ». *Environnement, Risques & Santé* 4 (3) : 187-94.
- Pascault, Noémie. 2010. « Réponse des communautés microbiennes du sol à l'apport de résidus de culture : influence des pratiques agricoles et lien avec le fonctionnement biologique du sol ». Phdthesis, Université de Bourgogne. <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-00582567>.
- Plassart, Pierre, Nicolas Chemidlin Prévost-Bouré, Stéphane Uroz, Samuel Dequiedt, Dorothy Stone, Rachel Creamer, Robert I. Griffiths, Mark J. Bailey, Lionel Ranjard, et Philippe Lemanceau. 2019. « Soil Parameters, Land Use, and Geographical Distance Drive Soil Bacterial Communities along a European Transect ». *Scientific Reports* 9 (1) : 605. <https://doi.org/10.1038/s41598-018-36867-2>.
- Ponge, Jean-François. 2000. « Biodiversité et biomasse de la faune du sol sous climat tempéré ». *Comptes Rendus de l'Académie d'Agriculture de France* 86 (8) : 129-35.
- Ruzicka, Jaromir, et Elo Harald Hansen. 1988. *Flow Injection Analysis*. John Wiley & Sons.
- Schiavon, M., C. Perrin-Ganier, et Jm Portal. 1995. « La pollution de l'eau par les produits phytosanitaires : état et origine ». *Agronomie* 15 (3-4) : 157-70. <https://doi.org/10.1051/agro:19950301>.
- Tamang, Sagar, P. Venkatarao, et Gautam Chakraborty. 2017. « Varietal Screening of Mungbean Cultivars for Resistance/Tolerance against Insect Pest under Terai Agro Ecological Zone of West Bengal. » *International Journal of Plant Protection* 10 (1) : 7-13.
- Tang, Jia, Yanhua Mo, Jiaying Zhang, et Renduo Zhang. 2011. « Influence of Biological Aggregating Agents Associated with Microbial Population on Soil Aggregate Stability ». *Applied Soil Ecology* 47 (3) : 153-59. <https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2011.01.001>.
- TASEI, Jean-Noël. 1996. « Impact des pesticides sur les Abeilles et les autres pollinisateurs ». *Le Courrier de l'environnement de l'INRA* 29 (29) : 9-18.
- Thiollet-Scholtus, Marie. 2021. « Caractérisation et performances de systèmes de culture et de production en rupture ». Thesis, Université de Lorraine ; École doctorale SIRENa - Science et ingénierie des ressources naturelles. <https://hal.univ-lorraine.fr/tel-03295544>.

- 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*.  
<https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2018.09.023>.
- Thoumazeau, Alexis, Frédéric Gay, Pascal Alonso, Nopmanee Suvannang, Audjima Phongjinda, Phantip Panklang, Tiphaine Chevallier, Cécile Bessou, et Alain Brauman. 2017. « SituResp : A Time- and Cost-Effective Method to Assess Basal Soil Respiration in the Field ». *Applied Soil Ecology*.  
<https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2017.10.006>.

## Annexes

p-value du test post hoc TukeyHSD ou Wilcoxon (Anova ou Kruskal-Wallis)								
SituResp					POXC			
Bloc	Avit	Arbre	Dvigne	Tvit	Avit	Arbre	Dvigne	Tvit
3 - 2	0,93	0,99	0,94	0,84	0,07	0,9	0,67	0,94
2 - 1	0,88	0,98	0,88	0,17	<b>0,0008***</b>	0,73	<b>0,02*</b>	0,49
1 - 3	0,99	0,99	0,98	0,34	0,057	0,94	0,14	0,71
Lamina Baits					VESS			
Bloc	Avit	Arbre	Dvigne	Tvit	Avit	Arbre	Dvigne	Tvit
3 - 2	0,24	0,88	0,94	0,91	0,35	0,57	0,33	0,59
2 - 1	<b>0,007**</b>	0,24	<b>0,02*</b>	0,47	0,14	0,24	0,09	0,45
1 - 3	0,78	0,43	<b>0,041*</b>	0,67	0,8	0,74	0,71	0,98
Beerkan					Stabilité des agrégats			
Bloc	Avit	Arbre	Dvigne	Tvit	Avit	Arbre	Dvigne	Tvit
3 - 2	0,75	0,44	0,75	0,9	0,99	0,8	0,84	0,93
2 - 1	0,28	<b>0,01*</b>	<b>0,003**</b>	0,68	0,48	0,14	0,51	<b>0,007**</b>
1 - 3	0,68	<b>0,03*</b>	<b>0,009**</b>	0,94	0,51	0,31	0,84	<b>0,009**</b>
Extraction N (KCI)					Membrane anionique			
Bloc	Avit	Arbre	Dvigne	Tvit	Avit	Arbre	Dvigne	Tvit
3 - 2	0,55	0,1	0,72	0,89	0,22	0,99	0,63	0,87
2 - 1	0,07	0,07	0,71	0,74	0,08	0,12	0,6	0,65
1 - 3	0,37	0,94	0,94	0,95	0,81	0,14	0,99	0,9

Annexe 1 : Résultats des p-value des tests statistiques en fonction des blocs de chaque système pour tous les indicateurs.





**P.1 - Villeneuve le Maguelonne** (Occupation du sol : pois chiches, Coordonnés : X:570054.00 m E, Y:4820338.00 m N)

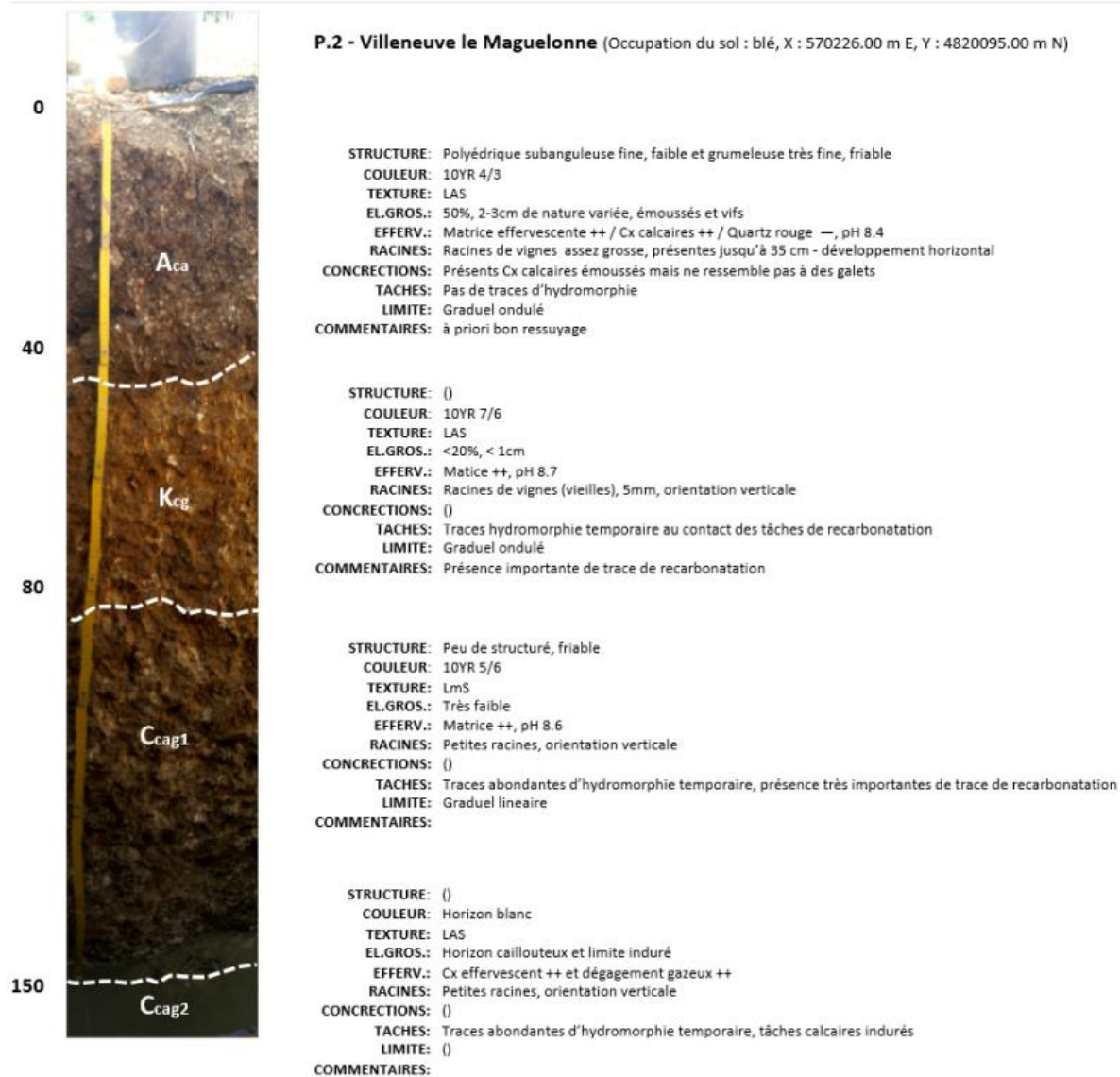
STRUCTURE: Pas de structure ou grenue, friable  
 COULEUR: 10YR/4/3  
 TEXTURE: LAS  
 EL.GROS.: Importante, roulés de 2-3cm (faible réaction à HCl, autres anguleuses ++)  
 EFFERV.: Matrice effervescente +++ (gas et boules)  
 RACINES: Jusque à 40cm, vieilles, traces noires  
 CONCRECTIONS: Présents Cx calcaires émousés mais ne ressemble pas à des galets  
 TACHES: Pas de traces d'hydromorphie temporaire  
 LIMITE: ()  
 COMMENTAIRES: ()

STRUCTURE: Polyédrique angulaire, frais, plutôt sec  
 COULEUR: 10YR/7/8 (plus blanc que H1)  
 TEXTURE: LAS  
 EL.GROS.: De petite taille <1cm  
 EFFERV.: Matrice ++++  
 RACINES:  
 CONCRECTIONS: Calcaires de 3-4cm  
 TACHES: Traces d'hydromorphie temporaire  
 LIMITE: ()  
 COMMENTAIRES: Calcaire un peu dur, transition frais/humide/dur/altéré

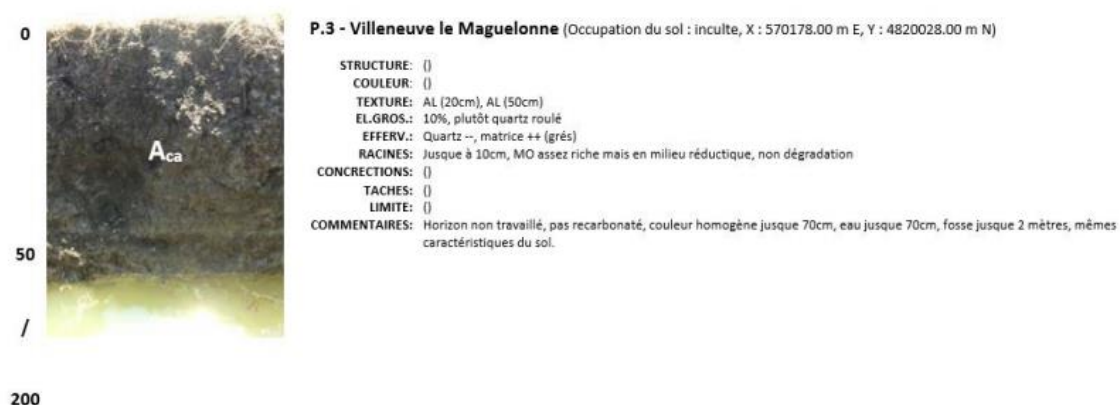
STRUCTURE: Calcaire rassemblable à la roche décomposée, humide  
 COULEUR: 10YR/5/6, sol blanc  
 TEXTURE: LSA  
 EL.GROS.: Importante, <1cm, très faibles  
 EFFERV.: Matrice ++++  
 RACINES: Présence de racines, vigne(?)  
 CONCRECTIONS: ()  
 TACHES: Traces abondantes d'hydromorphie temporaire  
 LIMITE: ()  
 COMMENTAIRES: Cailloux blanc, texture onctueuse gorgé d'eau

STRUCTURE: Petits cailloux fragmentés (roche altérée), fragmentaire moyennement dur mais qui se désagrège suite à chock  
 COULEUR: ()  
 TEXTURE: ()  
 EL.GROS.: ()  
 EFFERV.: ()  
 RACINES: ()  
 CONCRECTIONS: ()  
 TACHES: Pas d'hydromorphie  
 LIMITE: ()  
 COMMENTAIRES:

Annexe 2 : Profil 1 de la fosse pédologique en Juin de la parcelle du dispositif.

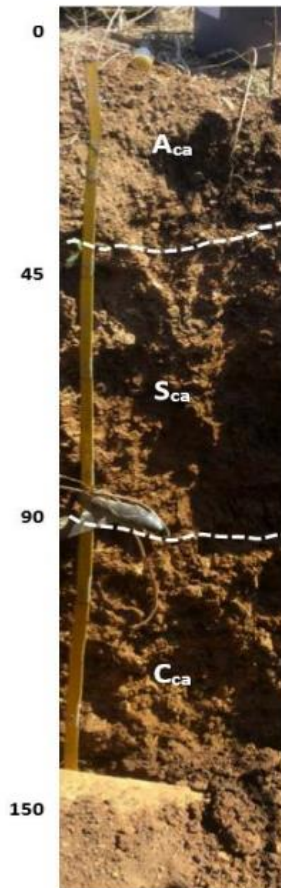


Annexe 3 : Profil 2 de la fosse pédologique en Juin de la parcelle.



Annexe 4 : Profil 3 de la fosse pédologique en Juin de la parcelle.

**P.4 - Villeneuve le Maguelonne** (Occupation du sol : blé, X : 570316.00 m E, Y : 4820040.00 m N)



STRUCTURE: ()  
 COULEUR: 10YR/4/3  
 TEXTURE: A  
 EL.GROS.: Tx important, (< et > 1cm)  
 EFFERV.: Matrice effervescente +, Cx calcaires ++ / Quartz — / Grés +  
 RACINES: Racines de chardons et blé  
 CONCRECTIONS: ()  
 TACHES: ()  
 LIMITE: ()  
 COMMENTAIRES: ()

STRUCTURE: ()  
 COULEUR: 10YR/4/6  
 TEXTURE: A  
 EL.GROS.: Quelques gros cailloux (5cm), quelque uns ronds  
 EFFERV.: Matrice très faible  
 RACINES: Très peu et petite taille  
 CONCRECTIONS: ()  
 TACHES: Pas hydromorphie apparente  
 LIMITE: ()  
 COMMENTAIRES: MO mal décomposée, petites occlusions noires charbon), pas généralisé

STRUCTURE: ()  
 COULEUR: 10YR/5/8  
 TEXTURE: A  
 EL.GROS.: Cailloux altérés mais pas comme H3 in fosse 1, cailloux pas roulés, pas de quartz, non recarbonatation  
 EFFERV.: Cx effervescent ++, matrice ++  
 RACINES: Petites racines, orientation verticale  
 CONCRECTIONS: ()  
 TACHES: ()  
 LIMITE: ()  
 COMMENTAIRES: Correspond pas au fond de la fosse P2

Annexe 5 : Profil 4 de la fosse pédologique en Juin de la parcelle.

Placette	Système	Bloc	Ordre passage
P9	Dvit	2	1
P2	Tvit	1	2
P5	Avit	1	3
P2	Tvit	3	4
P5	Dvit	1	5
P5	Dvit	2	6
P2	Avit	2	7
P4	Avit	1	8
P8	Dvit	2	9
P1	Avit	1	10
P1	Dvit	3	11
P8	Dvit	3	12
P8	Dvit	1	13
P9	Dvit	3	14
P7	Dvit	2	15
P6	Dvit	3	16
P3	Tvit	3	17
P4	Tvit	1	18
P2	Dvit	2	19
P3	Avit	1	20
P1	Tvit	1	21
P3	Dvit	3	22
P4	Avit	3	23
P4	Tvit	3	24
P3	Avit	3	25
P3	Dvit	2	26
P3	Tvit	1	27
P5	Avit	3	28
P6	Dvit	2	29
P1	Avit	3	30
P1	Avit	2	31
P1	Tvit	3	32
P7	Dvit	1	33
P3	Tvit	2	34
P7	Dvit	3	35
P2	Tvit	2	36
P2	Avit	3	37
P2	Dvit	3	38
P1	Dvit	2	39
P4	Avit	2	40
P5	Tvit	1	41
P5	Tvit	2	42
P2	Dvit	1	43
P1	Tvit	2	44
P4	Dvit	2	45
P3	Dvit	1	46
P3	Avit	2	47
P1	Dvit	1	48
P5	Dvit	3	49
P4	Dvit	1	50
P9	Dvit	1	51
P5	Tvit	3	52
P2	Avit	1	53
P6	Dvit	1	54
P5	Avit	2	55
P4	Tvit	2	56
P4	Dvit	3	57

Annexe 6 : Tirage aléatoire pour l'ordre de passage des placettes pour BFT.

## **Application et évaluation de « Biofunctool », un indice de qualité des sols, sur des systèmes agroécologiques viticoles Méditerranéens du Projet Salsa.**

### **Analyse des résultats « Biofunctool » en fonction des systèmes viticoles (agroécologiques versus conventionnels).**

Biofunctool est un outil méthodologique qui permet l'évaluation de la qualité/santé d'un sol par l'agrégation de 9 indicateurs qui considèrent les trois fonctions clés du sol selon Kibblewhite et al., (2008). Biofunctool tente d'apporter une approche intégrée en mesurant des indicateurs fonctionnels basés sur le rôle des organismes du sol contrairement à des indicateurs de stock uniquement (C, N, biomasse microbienne...).

Le projet Salsa propose de travailler sur des systèmes de culture viticole présentant une rupture majeure d'usage des produits phytosanitaires (80% à 100% de réduction d'IFT). Ces systèmes mobilisent la résistance variétale, les régulations naturelles, une gestion du sol sans herbicide et des traitements en dernier recours. Ces systèmes de culture seront opposés à un système de référence du bassin viticole languedocien qui comprend un désherbage chimique, le labour et l'usage des produits phytosanitaires.

Dans cette étude, Biofunctool sera déployé sur le dispositif expérimental du projet Salsa de Montpellier dirigé par l'UMR ABSys. Nous évaluerons ensuite les résultats de Biofunctool en fonction des systèmes viticoles afin d'estimer l'impact des pratiques agricoles sur la qualité/santé des sols.

**Mots clés** : Sol ; Biofunctool ; Agroécologie ; Montpellier ; Projet Salsa.

### **Application and evaluation of “Biofunctool”, a soil quality index, on Mediterranean agroecological viticultural systems of the Salsa Project.**

#### **Analysis of “Biofunctool” results according to wine-growing systems (agroecological versus conventional).**

Biofunctool is a methodological tool which allows the evaluation of the health of a soil by the aggregation of 9 indicators which consider the three key functions of the soil according to Kibblewhite et al., (2008). Biofunctool attempts to provide an integrated approach by measuring functional indicators based on the role of soil organisms, unlike stock indicators only (C, N, microbial biomass, etc.).

The Salsa project proposes to work on wine growing agroecological systems allowing a major cut in the use of phytosanitary products (80% to 100% reduction in IFT). These systems bring varietal resistance, biocontrol, herbicide-free soil management while phytosanitary treatments are used as a last resort. These cultivation systems are opposed to a reference system for the Languedoc wine-growing area which includes chemical weeding, tillage and the use of phytosanitary products.

In this study, Biofunctool will be deployed on the experimental device of the Salsa project in Montpellier led by UMR ABSys. We will then evaluate the results of Biofunctool according to the viticultural systems in order to estimate the impact of agricultural practices on the quality / health of the soils.

**Key-words** : Soil ; Biofunctool ; Agroecology ; Montpellier ; Salsa project.