



Année Universitaire 2019-2020

MASTER Sciences et Technologie de l'Agriculture, de
l'Alimentation et de l'Environnement

Gestion de la Qualité des Productions Végétales
1^{ère} année

Poss Benoît

RAPPORT D'ETUDES

Analyse des paramètres électromagnétiques des sols

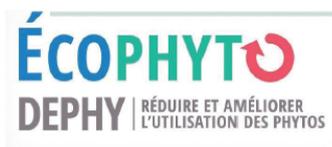
Réseau Ferme DEPHY
MARAICHAGE SOUS ABRIS



Chambre d'agriculture des Bouches-du-Rhône
22 Avenue Henri Pontier
13626 Aix-en-Provence cedex 1
04.42.23.06.11
www.chambre-agriculture13.fr

Maître de Stage : Laurent Camoin
Contact : l.camoin@bouches-du-rhone.chambagri.fr

Programme et financement :



Action du plan Ecophyto piloté par les ministères en charge de l'agriculture, de l'écologie, de la santé et de la recherche, avec l'appui technique et financier de l'Office français de la Biodiversité.

Sommaire

1. Contexte	5
1.1. Les Chambres d'agriculture	5
1.2. Ferme DEPHY	5
1.3. Thématique commune du groupe	6
2. Paramètres étudiés	6
2.1. Potentiel hydrogène (pH)	6
2.1.1. Généralités	6
2.1.2. Gestion du pH	7
2.2. Potentiel d'oxydoréduction (potentiel Redox)	8
2.2.1. Généralités	8
2.2.2. Utilisation d'intrants	9
2.2.3. Gestion de l'eau	9
2.2.4. Travail du sol	9
2.2.5. Rotation des cultures	10
2.2.6. Gestion du potentiel d'oxydoréduction	10
2.3. Conductivité	10
2.3.1. Généralités	10
2.3.2. Gestion de la conductivité	11
2.4. Nitrates	11
2.5. Stabilité structurale	12
2.6. Intrants et microorganismes	12
2.7. Potentiel d'oxydoréduction, pH et plante	13
2.8. Objectifs	14
3. Matériels et méthodes	15
3.1. Sites d'étude	15
3.1.1. Exploitation n°1	15
3.1.2. Exploitation n°2	16
3.1.3. Exploitation n°3	16
3.1.4. Exploitation n°4	17
3.1.5. Exploitation n°5	18
3.1.6. Exploitation n°6	19
3.1.7. Exploitation n°7	20
3.1.8. Exploitation n°8	20
3.1.9. Exploitation n°9	21

3.1.10.	Exploitation n°10	22
3.2.	Analyses de sols.....	23
3.2.1.	Prélèvement des échantillons de sol.....	23
3.2.2.	Mesure du pH et du potentiel d'oxydoréduction.....	24
3.2.3.	Analyse de la conductivité.....	24
3.2.4.	Mesure des nitrates.....	24
3.2.5.	Analyse de la stabilité structurale	25
4.	Résultats et discussion	25
4.1.	Amélioration du protocole	25
4.1.1.	Analyse du pH.....	25
4.1.2.	Test du protocole avec des terreaux dont les propriétés sont connues.....	26
4.1.3.	Test du protocole avec modification de certains paramètres	27
4.1.4.	Réaction chimique entre l'eau et l'air	28
4.1.5.	Analyse du potentiel d'oxydoréduction	28
4.1.6.	Test de dynamisation	29
4.1.7.	Variabilité induite par la sonde	30
4.1.8.	Amélioration de la mesure de potentiel d'oxydoréduction et de pH	30
4.1.9.	Analyse de la conductivité.....	31
4.1.10.	Analyse de la stabilité structurale	31
4.1.11.	Influence du sol séché et tamisé	31
4.1.12.	Discussion	33
4.1.13.	Evolution du protocole :.....	34
4.2.	Résultats de l'exploitation n°1	35
4.2.1.	Évolution du pH, du redox, de la teneur en nitrates et de la conductivité	35
4.2.2.	Test de stabilité structurale.....	36
4.3.	Résultats de l'exploitation n°2	36
4.3.1.	Évolution du pH, du redox, de la teneur en nitrates et de la conductivité	36
4.3.2.	Test de stabilité structurale.....	38
4.4.	Résultats de l'exploitation n°3	38
4.4.1.	Évolution du pH, du redox, de la teneur en nitrates et de la conductivité	38
4.4.2.	Test de stabilité structurale.....	40
4.5.	Résultats de l'exploitation n°4	41
4.5.1.	Évolution du pH, du redox, de la teneur en nitrates et de la conductivité	41
4.5.2.	Test de stabilité structurale.....	44
4.6.	Résultats de l'exploitation n°5	45
4.6.1.	Évolution du pH, du redox, de la teneur en nitrates et de la conductivité	45

4.6.2.	Test de stabilité structurale.....	46
4.7.	Résultats de l'exploitation n°6	47
4.7.1.	Évolution du pH, du redox, de la teneur en nitrates et de la conductivité	47
4.7.2.	Test de stabilité structurale.....	48
4.8.	Exploitation n°7	49
4.8.1.	Évolution du pH, du redox, de la teneur en nitrates et de la conductivité	49
4.8.2.	Test de stabilité structurale.....	50
4.9.	Résultats de l'exploitation n°8	51
4.9.1.	Évolution du pH, du redox, de la teneur en nitrates et de la conductivité	51
4.9.2.	Test de stabilité structurale.....	52
4.10.	Résultats de l'exploitation n°9.....	53
4.10.1.	Évolution du pH, du redox, de la teneur en nitrates et de la conductivité	53
4.10.2.	Test de stabilité structurale.....	54
4.11.	Résultats de l'exploitation n°10.....	55
4.11.1.	Évolution du pH, du redox, de la teneur en nitrates et de la conductivité	55
4.11.2.	Test de stabilité structurale.....	59
4.12.	Influences des différents paramètres	60
4.12.1.	Slake test, texture du sol et activité microbiologique.....	60
4.12.2.	Stabilité structurales et paramètres électro-magnétiques	61
4.12.3.	Nitrates et conductivité électrique.....	62
5.	Conclusion	63
	Références.....	65
	Résumé.....	69
	Abstract	69

1. Contexte

1.1. Les Chambres d'agriculture

Les Chambres d'agriculture sont des organismes consulaires, ayant pour but de représenter les acteurs du secteur agricole, rural et forestier. Depuis leur création en 1924, elles ont pour objectif de développer les exploitations et filières du territoire d'un point de vue économique, social et environnemental. Ainsi, les Chambres sont des prestataires de services aux agriculteurs. La Chambre d'agriculture des Bouches-du-Rhône est située à Aix-en-Provence. Elle est composée de différents pôles – filières végétales – maraîchage, arboriculture et viticulture –, élevage, eau & environnement, qualité, aménagement du territoire, économie & entreprise, communication, promotion. Le service maraîchage dans lequel j'ai effectué mon stage, se compose du chef de pôle (filière végétale) et de trois conseillers. Il assure un soutien technique auprès des maraîchers du département via des prestations de conseil collectif et individuel, direct ou indirect, la réalisation de documents (fiches techniques, bulletin mensuel « Treiz'Maraîchage », ...), l'expérimentation, la participation et l'animation de réseau et filière à différentes échelles.

1.2. Ferme DEPHY

Le plan Ecophyto 2 lancé en 2015, a pour projet de réduire l'utilisation des produits phytosanitaires de 50% à l'horizon 2025, avec une étape à 25% en 2020, et de réduire les risques et impacts de ces substances. Le réseau des Fermes DEPHY (Démonstration, Expérimentation et Production de références sur les systèmes économes en pHYtosanitaires) fait partie des nombreuses mesures mises en place pour atteindre ces objectifs. Il constitue un réseau d'exploitations et de lycées agricoles, engagés dans un processus de démonstration et de production de références. Les Fermes DEPHY ont pour but de mettre en place des pratiques visant à réduire l'utilisation des produits phytosanitaires, tout en conservant la performance économique de l'exploitation. Ainsi cela permet de valider ces pratiques sur le terrain et de communiquer les résultats positifs. Pour cela l'agriculteur est accompagné par un ingénieur réseau pour la réalisation d'un diagnostic de l'exploitation, la construction du projet de réduction de l'utilisation des produits phytosanitaires (via la mise en place de pratiques et de techniques compatibles avec les contraintes de l'agriculteur), un suivi de l'évolution du projet et des échanges sur les pratiques avec les autres agriculteurs du groupe.

Un réseau de Fermes DEPHY en maraîchage sous abris a été créé en 2011 à la Chambre d'Agriculture des Bouches-du-Rhône. En 2016, les exploitations de ce réseau se sont réengagées pour un période de 5 ans, autour d'un projet collectif « Améliorer la fertilité des sols » dans une optique de baisse des intrants phytosanitaires. Elles ont alors accepté de mettre en place des pratiques visant à améliorer cet aspect agronomique, pour atteindre leurs objectifs

et celui du plan Ecophyto. Le sol représente un levier d'action vis-à-vis de la protection phytosanitaire. En effet, de nombreuses maladies proviennent d'un sol dégradé et déséquilibré. Par ailleurs, une forte activité biologique crée un environnement favorable au développement des cultures, permettant de lutter indirectement contre les ravageurs et maladies. Des pratiques sont donc réalisées dans les Fermes DEPHY, qui sont très fortement sollicités sous abris par la succession des rotations, un travail du sol récurrent et une fertilisation optimisée dans un objectif de rendement élevé.

1.3. Thématique commune du groupe

Le sol fournit aux cultures leur support mais ce n'est pas sa principale fonction. En effet, c'est un milieu complexe qui fournit une large gamme de services écosystémiques. Il résulte de l'interaction entre la roche mère, les plantes, les microorganismes et le climat. Les microorganismes sont essentiels dans un sol. Ils dégradent les composés complexes, notamment la matière organique, présents dans le sol en ions solubles facilement assimilables par les plantes. Les microorganismes ont également un impact positif sur la structuration du sol. Afin qu'un sol soit fertile il est donc important d'avoir une activité biologique élevée. Les propriétés physiques (compaction, structure, ...) et chimiques (pH, potentiel d'oxydoréduction, conductivité, ...) impactent également la fertilité du sol. Cependant, ils sont eux-mêmes fortement impactés par l'activité biologique et inversement. Favoriser la présence de microorganismes dans un sol cultivé permet d'améliorer les propriétés de ce sol et donc les rendements cultureux. De plus, un sol biologiquement actif limitera l'apparition de maladies telluriques. Par conséquent, il est important de favoriser la présence de micro-organismes et leur installation et de limiter l'utilisation de pratiques culturales qui pourraient leur être néfaste.

2. Paramètres étudiés

Plusieurs paramètres sont suivis et étudiés pour mettre de caractériser le sol et les pratiques culturale. Ces paramètres sont définis, décrits et leur gestion est proposé selon divers travaux, publications et ouvrages existants sur le sujet.

2.1. Potentiel hydrogène (pH)

2.1.1. Généralités

L'abréviation pH renvoie à la notion de potentiel hydrogène. Le pH est une grandeur sans unité. Un indice qui permet de mesurer l'activité de l'ion hydrogène (proton H^+) dans une

solution. Pour un milieu donné, le pH est fonction de la concentration en ions hydronium (H_3O^+). Il est donné par la relation suivante : $\text{pH} = -\log [\text{H}_3\text{O}^+]$.

Le pH optimal pour la croissance des plantes est de 6,5 à 7 (Husson, 2013). Le pH du sol est principalement impacté par la présence de microorganismes et par l'exsudation racinaire. Les principaux processus produisant de l'acidité dans les sols sont la production d'acides organiques et/ou d'acide nitrique par les microorganismes du sol, la respiration des organismes vivants (racines, microorganismes) et l'absorption d'un excès de cations (Ca^{2+} , Mg^{2+} , K^+ , NH_4^+) par rapport aux anions (NO_3^- , PO_4^{2-}) par les racines. En général, plus la production de biomasse est élevée, plus forte est l'acidité. A l'inverse, les principaux processus produisant de l'alcalinité sont la dissolution des minéraux primaires et la réduction de différents composés (nitrates, bicarbonate, etc.). Les apports d'engrais azotés génèrent une progressive acidification si elle n'est pas contrebalancée par des amendements. En effet les engrais minéraux sont acides. La présence de microorganismes favorise l'acidification du milieu, leur présence étant fortement corrélée avec la disponibilité de l'eau, de l'air et de racines.

Une relation étroite existe entre les plantes et les microorganismes de leur rhizosphère. Un sol fertile voit donc sa population microbienne décroître avec la profondeur, donc son pH s'alcalinise avec la profondeur. Le pH est également corrélé avec la présence d'humus. La concentration en humus baisse en profondeur, donc le pH s'alcalinise. Cependant le travail du sol peut inverser cette tendance. En effet, il aura pour effet de déplacer les communautés bactériennes et fongiques, mais également la disponibilité en oxygène.

L'absorption active des éléments provoque une libération de protons (H^+) dans le milieu du fait du fonctionnement des pompes ATPases. De plus l'absorption par antiport des cations provoque la libération dans le sol de composés acidifiants, H^+ notamment. Le rejet de protons au niveau des poils absorbants des racines implique le remplacement progressif des cations présents dans la solution du sol (éventuellement associés au complexe argilo humique) par des protons, ce qui induit localement une acidification progressive du sol. Le développement de la culture au cours du temps provoque donc une acidification localisée du sol dans la rhizosphère. Un sol fertile a donc un pH qui s'alcalinise avec la profondeur. Et un sol malade voit son pH s'inverser ; il s'acidifie en profondeur.

2.1.2. Gestion du pH

Une inversion de pH serait induite par une absence de couverture végétale, en effet celle-ci protège le sol des ondes électromagnétiques cosmiques (Petiot, 2014). En cas d'inversion du pH, Petiot préconise d'utiliser de la poudre de roche, notamment du basalte, sur les sols alcalins (mais aussi sur sols acides grâce à ces multiples composants en grande partie alcalins et à 30% acides). En effet, le basalte est l'élément le plus paramagnétique et, d'après Petiot, les sols ayant un meilleur paramagnétisme comme les sols volcaniques seraient plus fertiles. La poudre de

roche basaltique doit être épandue en même temps que l'engrais organique. Mettre en place un engrais vert peut également avoir un effet bénéfique sur un sol à pH inversé.

2.2. Potentiel d'oxydoréduction (potentiel Redox)

2.2.1. Généralités

Le potentiel d'oxydoréduction est une grandeur thermodynamique qui mesure le pouvoir oxydant ou réducteur d'un système. Plus un système est oxydant, c'est-à-dire plus il est apte à se réduire en captant des électrons, plus son potentiel d'oxydoréduction est élevé. Plus il est réducteur et a tendance à céder des électrons, plus son potentiel d'oxydoréduction est bas. Le potentiel d'oxydoréduction se mesure en millivolts (mV) en utilisant un rédox-mètre.

Le potentiel d'oxydoréduction et le pH ne sont pas indépendants. Par exemple les réactions d'oxydoréduction peuvent engendrer un transfert de protons. C'est notamment le cas des réactions chimiques d'oxydation du fer, du manganèse et de l'azote qui impliquent également la consommation ou la production de H^+ (Husson 2013). Le potentiel d'oxydoréduction est un paramètre variable du sol qui évolue et qui peut présenter une forte hétérogénéité au sein d'un sol. Par exemple, la surface d'un agrégat de sol humide de 6 à 7 mm de diamètre peut avoir un potentiel d'oxydoréduction supérieur de +100 à +200 mV par rapport à son centre (Kaurichev & Tararina 1972). Divers auteurs ont également signalé des différences marquées de potentiel d'oxydoréduction et de pH en fonction de la profondeur du sol (Bohrerova et al, 2004 ; Mansfeldt 2003 ; Rousseau 1959 ; Snakin et al. 2001). De plus, la fraction vivante dans le sol crée une hétérogénéité importante du potentiel d'oxydoréduction et du pH dans un horizon donné du sol (Snakin et al. 2001). Les microorganismes sont connus pour pouvoir modifier le potentiel d'oxydoréduction et le pH de leur milieu environnant en fonction de leurs besoins (Rabotnova & Schwartz 1962). De plus, dans les sols aérobies, les microorganismes consomment de l'oxygène, ce qui a pour effet d'abaisser le potentiel d'oxydoréduction (Bohrerova et al. 2004 ; Kralova et al, 1992). Lorsque la teneur en eau du sol augmente, le potentiel d'oxydoréduction diminue, conduisant à des conditions d'anaérobies du sol en raison de la consommation rapide d'oxygène par les microorganismes et de la perte partielle ou totale d'oxygène qui en résulte (Savant & Ellis 1964). L'oxygène est un accepteur d'électrons, c'est donc un agent oxydant. La présence d'air et notamment d'oxygène a pour effet d'oxyder le milieu. Cependant, les argiles tamponnent le potentiel d'oxydoréduction du sol. Le fer, qui se lie à l'argile échange des électrons avec les microorganismes. La matière organique est un réservoir d'électron, elle a donc pour effet de diminuer le potentiel d'oxydoréduction et tamponne le sol à un pH neutre ou légèrement acide (Husson 2013). La présence de matière organique limite donc les fluctuations (Husson, 2013), ces dernières étant défavorables à la production végétale.

Quatre principales pratiques agricoles peuvent affecter le potentiel d'oxydoréduction et le pH du sol : l'application de fertilisants (organiques ou chimiques), la gestion de l'eau, le travail du sol et la rotation des cultures (Husson, 2013).

2.2.2. Utilisation d'intrants

Les amendements organiques dont les composts, contenant de l'eau, et donc limitant la présence d'air dans les sols, ont pour effet de réduire les sols. Les macérations/fermentations ou les produits lactofermentés sont de puissants réducteurs. Ces produits peuvent être utilisés comme outils pour les sols trop oxydés. En plus des pratiques spécifiquement conçues pour corriger les caractéristiques chimiques indésirables du sol, l'utilisation de produits agrochimiques a une influence sur le potentiel d'oxydoréduction et le pH. L'oxydation de l'urée ou du sulfate d'ammonium par les microorganismes produit des acides inorganiques puissants dont l'acide sulfurique, H_2SO_4 (Brady et Weil 2010), dangereux à terme pour la fertilité du sol.

2.2.3. Gestion de l'eau

L'irrigation et le drainage affectent grandement le potentiel d'oxydoréduction et le pH du sol. La saturation en eau du sol réduit la diffusion d'oxygène à travers les sols, car le coefficient de diffusion de l'oxygène à travers la solution du sol est environ 10 000 fois plus lente que la diffusion en phase gazeuse (Stolzy & Letey 1964). Un sol gorgé d'eau sera donc plus réduit du fait de l'absence d'oxygène. Lorsque des micro-organismes consomment de l'oxygène pour la respiration cela entraîne une diminution rapide du potentiel d'oxydoréduction du sol (Flessa & Fischer 1992 ; Lambers et al, 2008).

2.2.4. Travail du sol

Le travail du sol affecte également le potentiel d'oxydoréduction et le pH du sol, principalement en modifiant la structure du sol et la présence d'oxygène. La densité et la taille des agrégats, influencent grandement la désorption de l'eau du sol et la profondeur du sol vers laquelle l'oxygène pourrait se diffuser (Grable & Siemer 1967). Le travail du sol affecte la continuité des pores et les flux hydrauliques, gazeux et thermiques (Horn & Peth 2009). La réduction du nombre de pores grossiers conduit à des conditions anoxiques (Horn & Peth 2009). Le labour modifie l'aération du sol et affecte le potentiel d'oxydoréduction à l'horizon de surface, mais également en dessous de la zone labourée (Clay et al, 1992 ; Olness et al, 1989). A l'horizon de surface, le sol est alors plus oxydé et en profondeur un phénomène de tassement diminue la présence d'oxygène, il est donc plus réduit. Une faible concentration en oxygène favorise le développement des bactéries anaérobiques, donc la fermentation, et conduit à la transformation de matières organiques en méthane (Petiot, 2014).

2.2.5. Rotation des cultures

Le type de plantes cultivées et leur séquence dans la rotation des cultures influencent le potentiel d'oxydoréduction et le pH du sol pour deux raisons : les plantes et leurs micro-organismes associés jouent un rôle déterminant dans la formation et l'altération du sol (Lambers et al, 2009) et les apports de biomasses influencent la teneur en matière organique du sol, ce qui tamponne le potentiel d'oxydoréduction et le pH du sol (Paustian et al, 1997). Les plantes, en vieillissant, ont pour effet de légèrement oxyder le sol.

2.2.6. Gestion du potentiel d'oxydoréduction

D'après Eric Petiot (2014), pour un sol fertile, les valeurs subjectives de potentiel d'oxydoréduction doivent être aux alentours de +204 mV au printemps et de +430 mV en automne. Il est à noter qu'à l'automne les sols peuvent avoir tendance à prendre des valeurs de potentiel d'oxydoréduction basse, c'est-à-dire moins oxydé qu'au printemps.

Les valeurs de ce potentiel devraient augmenter avec la profondeur du sol, créant un gradient, un courant d'électron dans le sol. Si le potentiel d'oxydoréduction entre les différents horizons est trop rapproché (moins de 10 mV entre les horizons), cela signifie qu'il y a un début d'inversion électrique dans le sol, la texture du sol est altérée et il y a une déficience en microorganismes. En cas de potentiel d'oxydoréduction inversé entre les différents horizons souvent induit par le travail du sol, les engrais solubles ou les désherbants, Petiot (2014) préconise de réaliser des semis directs en grande culture, d'aérer le sol avec un griffage superficiel, de réaliser un décompactage léger, de mettre en place une couverture du sol vivante entre les cultures et d'apporter des extraits fermentés et des composts matures à base de pailles pour stimuler l'activité biologique.

2.3. Conductivité

2.3.1. Généralités

La conductivité électrique d'un sol est sa capacité à laisser les charges électriques se déplacer. Elle représente donc l'intensité des courants électriques dans un sol. La conductivité est mesurée en $S.m^{-1}$ (siemens par mètre), mais le plus souvent la mesure avec un conductimètre donne le résultat en $mS.cm^{-1}$ (millisiemens par centimètre). La conductivité d'un sol est dépendante de la concentration en métaux et en ions, ces éléments interagissant avec les électrons et étant chargés positivement ou négativement. Aujourd'hui, elle est utilisée en agriculture de précision comme indicateur très attractif pour caractériser le sol (Samouëlian et al, 2005). Cette technique de mesure, non invasive, permet aux chercheurs de caractériser diverses propriétés du sol. Elle donne des informations sur la capacité d'échange cationique (CEC), la salinité, les nutriments, l'humidité résiduelle, les débits d'eau, la texture du sol, les

propriétés liées à la texture (couches de sable, couches d'argile imperméables, etc.), la densité apparente et les zones de compactage ou de matière organique (Paillet et al, 2010 ; Samouëlian et al, 2005). Par exemple, la conductivité du sol augmente lorsque la densité apparente augmente (Richard et al, 2006 ; Seladji et al, 2010). De même, elle augmente lorsque la teneur en eau augmente car le contact entre les particules de sol est alors maximal. La concentration en nutriments (ions) augmente également la conductivité. Les microorganismes pourraient également impacter la conductivité. En effet, ils dégradent des molécules complexes n'ayant que peu d'influences sur la conductivité en molécules simples telles des ions l'augmentant significativement. Une forte activité microbienne pourrait donc traduire une forte conductivité. La concentration en humus, en nutriments et en microorganismes d'un sol fertile est maximale en surface et décroît en profondeur. La conductivité d'un sol diminue donc avec la profondeur. Un phénomène de tassement peut inverser cela. L'évolution de la conductivité sera grandement impactée par les prélèvements effectués par les plantes. Elle peut diminuer avec le temps si des apports d'engrais minéraux ou facilement assimilables (simples) sont apportés et peut rester stable voir augmenter si des apports d'éléments à minéralisation lente et/ou des apports continus au goutte à goutte sont effectués.

2.3.2. Gestion de la conductivité

En cas de valeurs de conductivités trop rapprochées entre les horizons du sol, Eric Petiot (2014) suggère d'apporter de la montmorillonite qui favorise les échanges ; d'apporter des fumures lorsque les températures sont inférieures à 12 °C qui vont produire des formes d'azotes organiques et non oxydées fournissant un substrat viable pour les microorganismes ; d'éviter les compactages en ne travaillant pas sur des sols humides et en pratiquant des décompactages ; de stimuler l'activité microbienne en apportant des extraits fermentés. Lorsque la conductivité entre les horizons est inversée, Eric Petiot (2014) suggère d'amender avec du charbon de bois ; de stimuler les microorganismes aérobies en réalisant un décompactage léger ; de mettre en place des engrais verts ; apporter de l'azote organique animal pour améliorer la productivité de la parcelle ; de protéger le sol avec une couverture vivante de sol, ou à défaut le bois raméal fragmenté étant idéal.

2.4. Nitrates

Les nitrates sont normalement présents en de plus grandes quantités dans les horizons de surface lors d'apport d'engrais organiques. Si des engrais minéraux sont utilisés, les nitrates peuvent être lessivés et s'accumuler en profondeur. En surface, c'est là que les microorganismes sont le plus présent. Ils auront pour action de réaliser la minéralisation de l'azote pour le rendre disponible pour les plantes, à condition d'épandre un amendement en surface. La minéralisation étant lente, de grandes quantités de nitrates ne seront pas présentes au même moment, mais disponibles plus longtemps. Les racines, plus présentes dans les horizons de surface, absorbent les nitrates et empêchent les lessivages. Les concentrations nitriques sont supérieures en surface

où la minéralisation induite par l'activité biologique est plus importante. Au cours du temps les concentrations en nitrates peuvent varier en fonction des apports et de la minéralisation. La forme d'azote présente dans le sol peut avoir un effet sur le pH du sol. En effet une plante qui absorbe des nitrates (NO_3^-) relâche des ions hydroxyde (OH^-) qui ont pour effet d'alcaliniser le sol. Une plante qui absorbe de l'ammonium (NH_4^+) relâche des protons (H^+) qui ont pour effet d'acidifier le sol (Marschner et al, 1986). Donc l'apport d'azote oxydé (nitrates) alcalinise le sol et *a contrario*, l'apport d'azote non-oxydé (ammonium, acides aminés, acides organiques) l'acidifie. De plus, la réduction des nitrates en ammonium, forme sous laquelle est utilisé l'azote pour la synthèse protéique, a un coût énergétique pour la plante (Marschner 1995). Un ratio nitrates/ammonium en faveur de l'ammonium dans un sol pourrait permettre à la plante de préserver son énergie pour la croissance et le développement. L'azote protéique pourrait fournir un substrat aux microorganismes du sol et fournirais des acides aminés directement utilisables après dégradation des protéines.

2.5. Stabilité structurale

La stabilité structurale d'un sol est en partie liée à l'activité biologique. En effet les microorganismes participent à la formation d'agrégats de sols grâce à la production de polysaccharides (Acton, 1962). De plus, l'activité des plantes peut stimuler la présence de microorganismes par l'exsudation racinaire et donc favoriser une bonne stabilité structurale. Tous les autres phénomènes favorisant l'activité biologique impactent positivement la stabilité structurale. Cependant la texture du sol peut également avoir un fort impact. En effet, les sols limoneux possèdent une bonne mémoire du travail du sol (Roissin). Le travail du sol va donc créer une bonne structure dans ces sols même en l'absence de l'activité biologique. La stabilité structurale des sols est analysée par la méthode du Slake test.

2.6. Intrants et microorganismes

Les microorganismes du sol sont naturellement présents, mais sont fortement stimulés par l'activité racinaire. Chaque plante est associée à des microorganismes spécifiques dans sa rhizosphère. Ils ont différents effets, mais le principal est de faciliter l'absorption de nutriment pour la plante. Ils vont en effet dégrader les molécules complexes non solubles donc non assimilables par la plante en ions solubles et facilement assimilables. Ils vont également impacter la structure du sol et la formation du complexe argilo-humique. La conduite culturale et plus précisément les intrants impactent la présence de microorganismes. En effet, un sol qui ne recevra que des engrais minéraux (composés d'ions solubles simples facilement assimilables par les plantes) ne verra pas sa population et sa diversité microbienne augmenter. Les microorganismes seront « au chômage », car n'auront pas de molécules complexes à dégrader (Petiot, 2020). Cependant, des molécules complexes, non solubles, composées d'une diversité d'éléments, ne sont pas facilement assimilables et plus longues à dégrader et demandent l'action de nombreuses espèces de microorganismes différentes. Apporter des engrais organiques, des

amendements tels que du compost (fumier frais ou à peine composté) « nourris » les microorganismes et favorise leur prolifération, ils auront également pour effet d'apporter de nouveaux microorganismes. Eric Petiot (2020) suggère d'apporter en même temps des extraits fermentés pour favoriser davantage la minéralisation des amendements organiques et matières fertilisantes. Un apport simultané de petit lait peut également être intéressant pour favoriser la dégradation des intrants organiques. Il suggère également d'épandre deux mois avant que le sol n'atteigne 12 °C sur les 10 premiers centimètres. L'azote organique serait, pendant ces deux mois, transformé par des familles de microorganismes spécifiques en azote protéique qui favoriserait le développement de microorganismes et la résistance des plantes.

2.7. Potentiel d'oxydoréduction, pH et plante

Le potentiel d'oxydoréduction et le pH sont des facteurs qui influencent fortement la mobilité de nombreux nutriments les sols (Gambrell & Patrick 1978 ; Laanbroek 1990). Les différentes formes chimiques d'un élément dans une solution sont dépendantes du potentiel d'oxydoréduction et du pH (Husson 2013). La disponibilité des nutriments dans un sol est donc liée à son potentiel d'oxydoréduction et son pH. Parmi les différentes réactions thermodynamiques, celles qui prédominent à un instant donné sont déterminées par la cinétique de potentiel d'oxydoréduction (Chadwick & Chorover 2001). Ces cinétiques sont également influencées par le potentiel d'oxydoréduction et le pH, car elles ont un impact sur l'activité microbienne qui catalyse ces réactions (Fenchel et al, 1998). Inversement, le potentiel d'oxydoréduction et le pH sont influencés par les divers éléments composant le sol, en particulier ceux qui ont une amplitude élevée dans leur nombre d'oxydoréductions, tels que l'azote, le phosphore ou le soufre, et ceux présents à des concentrations élevées tels que le fer (Husson 2013). En effet, leurs formes ioniques perdent ou gagnent beaucoup d'électrons, par exemple l'azote passe d'une charge de -III pour le NH_4^+ à +V pour le NO_3^- (Husson, 2013). Afin de rendre les éléments disponibles, la plante peut influencer sur le potentiel d'oxydoréduction et le pH du sol en libérant des composés issus de la photosynthèse (molécules carbonées). Elle compense également la baisse de potentiel d'oxydoréduction induite par la consommation d'oxygène des microorganismes aérobies de la rhizosphère. La plante dépense donc ses carbones fixés par la photosynthèse pour favoriser la présence d'éléments facilement assimilable dans le sol. Si la plante est dans un environnement où le potentiel d'oxydoréduction et le pH sont idéaux, elle n'aura pas besoin d'utiliser ses carbones pour corriger le potentiel d'oxydoréduction et le pH du milieu et pourra favoriser sa croissance et son développement et dans le cadre des plantes cultivées, son rendement. Avec des pratiques culturales et des systèmes de culture adaptés, on peut modifier les conditions bio-physico-chimiques du sol et le rendre optimal pour les végétaux. Le potentiel d'oxydoréduction et le pH du sol impactent également la présence de bio-agresseurs. Un sol acide-oxydé favorise le développement de champignon, un sol acide-réduit favorise le développement des algues vertes, un sol alcalin-oxydé favorise le développement de virus et un sol alcalin-réduit favorise le développement

d'algues brunes et de microorganismes pathogènes (Figure 1) (Husson 2013). Les plantes cultivées préfèrent un milieu neutre légèrement acide et peu oxydé. Par exemple, il existe des problèmes de fusariose après l'utilisation de glyphosate, car celui-ci a pour effet d'acidifier et d'oxyder le sol (Husson 2013). Des pratiques culturales adaptées et des systèmes de culture construits en ce sens permettraient donc de limiter les bio-agresseurs.

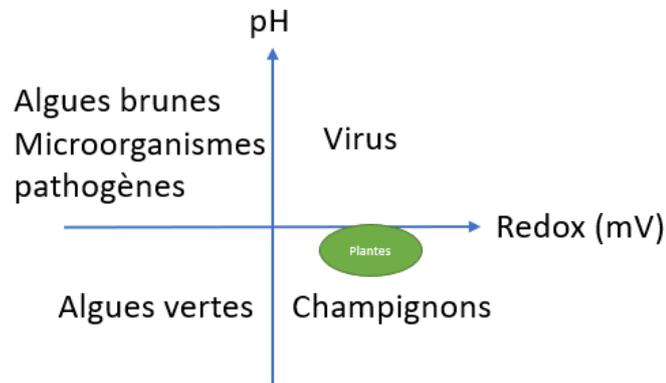


Figure 1 : Influence du pH et du potentiel d'oxydoréduction sur les maladies et ravageurs

2.8.Objectifs

En interaction avec l'état sanitaire et les pratiques culturales telles que l'apport de fumure, d'engrais organique ou minéral, de vinasse de betterave, d'extraits fermentés ou d'engrais solubles, divers paramètres du sol des exploitations du réseau Ferme DEPHY ont été analysés : pH, potentiel d'oxydoréduction, conductivité, taux de nitrates et stabilité structurale. Ces analyses poursuivent le travail réalisé en 2018 par Lucas Tosello portant sur les amendements, notamment leur minéralisation et la stabilité structurale des sols. Les analyses ont été réalisées pour trois horizons de sol superficiel à l'aide d'une sonde pH/redox et d'une sonde conductivité, du Nitracheck et du Slake-test à différents stades de la culture. L'objectif est de mieux comprendre l'évolution de ces paramètres et leur influence sur la culture et la fertilité du sol. L'analyse de ces paramètres devrait à terme permettre aux producteurs de connaître les pratiques favorisant l'activité biologique des sols et ainsi adapter leurs pratiques culturales en conséquence.

3. Matériels et méthodes

3.1. Sites d'étude

Les sols de 10 exploitations du réseau Ferme DEPHY ont été prélevés pour être analysés dans cette étude. Les paramètres suivants ont été mesurés : le pH, le potentiel d'oxydoréduction, le taux de nitrates, la conductivité et la stabilité structurale. Chaque exploitation a des stratégies de gestion de la fertilisation différentes, des types de sols différents et ne pratique pas les mêmes conduites culturales.

3.1.1. Exploitation n°1

Cette exploitation est située à Saint-Andiol. Elle produit de la laitue et de la tomate sous abri plastique.

Tableau 2 : Caractéristique du sol n°1

Type de sol	Taux moyen de cailloux	Densité apparente
Limoneux (+calcaire) (26,4% d'argile, 48,2% de limon et 25,4% de sable)	30%	1,5

Les amendements réalisés pour la culture de tomate pour la saison 2019-2020 sont :

Tableau 2 : Amendement de la saison 2019-2020 pour la culture de tomate de l'exploitation n°1

Nom de l'amendement	Quantité apportée (T/ha)	Estimation quantité azote (kg/ha)
Compost de déchets verts Tradisol (1,9-2-0,6)	25	475
Humi-activ	1,5	NA

Les outils de travail de sol appliqué avant plantation : sous-soleuse, herse rotative, enfouisseur de cailloux et roulage superficiel. Des engrais minéraux sont apportés tous les jours via le système d'irrigation à hauteur de 1,8 unités d'azote, 3,3 unités de phosphore et 7,4 unités de potassium par jour et par hectare.

Les prélèvements ont été effectués en culture de tomates dans le cinquième tunnel du bloc de 11 tunnels situé au nord de l'exploitation.

3.1.2. Exploitation n°2

Cette exploitation est située à Tarascon. Elle est conduite en agriculture biologique et selon le cahier des charges de la biodynamie. Elle produit la gamme suivante sous abris plastique : laitues, radis, melon, fraise, poivron et tomate.

Tableau 3 : Caractéristique du sol n°2

Type de sol	Taux moyen de cailloux	Densité apparente
Limoneux fin (+calcaire) (25,8% d'argile, 65,9% de limon et 8,3% de sable)	0%	1,4

Les amendements réalisés pour la culture de poivron pour la saison 2019-2020 sont :

Tableau 4 : Amendement de la saison 2019-2020 pour la culture de poivron de l'exploitation n°2

Nom de l'amendement	Quantité apportée (T/ha)	Estimation quantité azote (kg/ha)
Compost de fumier de cheval (0,92-0,51-0,64)	30	276

Outils de travail du sol : sous-soleuse, herse rotative, roulage de surface. De la vinasse de betterave à hauteur de 20 L/ha/semaine a été apportée à partir du 1^{er} Mai.

Les prélèvements ont été effectués en culture de poivron dans le 7^e tunnel.

3.1.3. Exploitation n°3

Cette exploitation est située à Saint Martin de Crau. Elle produit de la laitue, de la tomate et de l'aubergine sous abris plastique.

Tableau 4 : Caractéristique du sol n°3

Type de sol	Taux moyen de cailloux	Densité apparente
Limoneux (24% d'argile, 29,6% de limon et 46,4% de sable)	40%	1,5

Les amendements réalisés pour la culture d'aubergines pour la saison 2019-2020 sont :

Tableau 5 : Amendement de la saison 2019-2020 pour la culture d'aubergines de l'exploitation n°3, bloc Nord-Ouest

Nom de l'amendement	Quantité apportée (T/ha)	Estimation quantité azote (kg/ha)
Guanhumus (2,5-3,5-2)	1	25

Tableau 5bis : Amendement de la saison 2019-2020 pour la culture d'aubergines de l'exploitation n°3, bloc Centre

Nom de l'amendement	Quantité apportée (T/ha)	Estimation quantité azote (kg/ha)
Compost Tradivert (1-0,4-0,6)	35	350

Outils de travail du sol : sous-solage, enfouisseur de pierres, rouleuse de surface. De l'engrais complet 15 % azote – 10 % phosphore – 30 % potassium à hauteur de 150 kg/ha/semaine à partir du 01/05 (soit 22,5 unités d'azote, 15 unités de phosphore et 45 unités de potassium) et du Rise-P (*Bacillus amyloliquefaciens*) à 200 g/ha le 21/04, le 25/05 et le 26/06 ont été apportés.

Les prélèvements ont été effectués en culture d'aubergines dans le dixième tunnel du bloc centre et dans le sixième tunnel du bloc nord-ouest.

3.1.4. Exploitation n°4

Cette exploitation est située à Entressen, conduite en agriculture biologique. Elle produit des légumes de diversification l'hiver et de la courgette et de la tomate dans une serre verre.

Tableau 6 : Caractéristique du sol n°4

Type de sol	Taux moyen de cailloux	Densité apparente
Limoneux argilo-sableux (22,6% d'argile, 24,7% de limon et 57,7% de sable)	40%	1,4

Les amendements réalisés pour la culture de courgettes pour la saison 2019-2020 sont :

Tableau 7 : Amendement de la saison 2019-2020 pour la culture de courgettes de l'exploitation n°4

Nom de l'amendement	Quantité apportée (T/ha)	Estimation quantité azote (kg/ha)
Fumier de mouton (1-0,55-1,9)	30	300
DCM Eco Mix4 (7-7-10)	2	140

Les amendements réalisés pour la culture de tomates pour la saison 2019-2020 sont :

Tableau 8 : Amendement de la saison 2019-2020 pour la culture de tomates de l'exploitation n°4

Nom de l'amendement	Quantité apportée (T/ha)	Estimation quantité azote (kg/ha)
Compost de fumier de vache (0,5-0,32-0,7)	30	150
DCM ECO XTRA 1 (8-5-6)	1	80
Patenkali (0-0-30)	1	0

Seul un travail du sol de surface a été effectué pour enfouir l'amendement en surface (5cm). En culture de courgettes dans la chapelle 1 (essai) du vinaigre blanc à 10 L/ha et de la vinasse de betterave à 10 L/ha ont été apportés le 11/02. Du petit lait de chèvre à 5 L/ha/semaine a été apporté à partir de 21/03 au goutte-à-goutte. Des extraits fermentés d'orties ont été apportés à 5 L/ha du 21/03 au 18/04 puis du 25/04 au 23/05 des extraits fermentés de céréales (kanné) ont été apportés à 5 L/ha. Du Rise-P (*Bacillus amyloliquefaciens*) à 200 g/ha a été apporté le 23/04. Du lotier corniculé a été semé sur l'inter-rang à 60 kg par hectare. Dans la chapelle 2 (témoin) 200 g/ha de Rise-P (*Bacillus amyloliquefaciens*) à 200 g/ha a été apporté le 23/04. Les intrants sont apportés à chaque fois au goutte-à-goutte.

Les prélèvements de sol ont été réalisés en culture de courgette le 26 mai et en culture de tomates le 18 juin pour les analyses de pH, potentiel d'oxydoréduction, nitrates et conductivité. Pour les analyses de stabilité structurale, les prélèvements ont été réalisés en culture de courgettes le 26 mai et en culture de tomates le 30 juin. En culture de courgettes, les prélèvements ont été effectués dans la première et la deuxième chapelle et dans la septième chapelle pour la culture de tomates. Le second prélèvement n'a pu avoir lieu car la culture a été arrachée car en fin de cycle. Il est observé en fin de culture une très forte attaque de fusariose dans l'ensemble de la culture.

3.1.5. Exploitation n°5

Cette exploitation est située à Salon de Provence, conduite en agriculture biologique. Elle produit de la laitue, de la mâche, et plusieurs solanacées et cucurbitacées.

Tableau 9 : Caractéristique du sol n°5

Type de sol	Taux moyen de cailloux	Densité apparente
Limoneux argilo-sableux (26% d'argile, 25,3% de limon et 48,7% de sable)	40%	1,55

Les amendements réalisés pour la culture de tomates pour la saison 2019-2020 sont :

Tableau 10 : Amendement de la saison 2019-2020 pour la culture de tomates de l'exploitation n°5

Nom de l'amendement	Quantité apportée (T/ha)	Estimation quantité azote (kg/ha)
Compost de fumier de cheval (0,92-0,51-0,64)	20	184
9-2-2	0,75	68
4-5-10	0,6	24

Un enfouisseur des cailloux, un roulage, un sous-solage et un travail de surface ont été réalisés. De la vinasse de betterave à 100 L/ha a été apportée le 11/05 et le 26/05.

Les prélèvements ont été effectués en culture de tomates dans le treizième tunnel.

3.1.6. Exploitation n°6

Cette exploitation est située à Maillane et est en conversion en agriculture biologique. Elle produit des laitues, du radis, du fenouil, du concombre, de l'aubergine et du poivron sous abri plastique.

Tableau 11 : Caractéristique du sol n°6

Type de sol	Taux moyen de cailloux	Densité apparente
Limoneux fin (+calcaire) (22,7% d'argile, 62,8% de limon et 14,5% de sable)	0%	1,4

Les amendements réalisés pour la culture de poivrons pour la saison 2019-2020 sont :

Tableau 12 : Amendement de la saison 2019-2020 pour la culture de poivrons de l'exploitation n°6

Nom de l'amendement	Quantité apportée (T/ha)	Estimation quantité azote (kg/ha)
Compost de déchets verts Tradisol (1,9-2-0,6)	20	380

Outils de travail du sol : rouleuse, herse rotative, bineuse, sous-soleuse et un travail de surface a été réalisé. Aucune fertilisation complémentaire n'a été réalisée.

Les prélèvements ont été effectués en culture de poivron dans le cinquième tunnel du bloc 7.

3.1.7. Exploitation n°7

Cette exploitation est située à Châteaurenard. Elle produit de la tomate dans une multi chapelle verre chauffée.

Tableau 13 : Caractéristique du sol n°7

Type de sol	Taux moyen de cailloux	Densité apparente
Limoneux (+ calcaire) (19% d'argile, 48,9% de limon et 32,1% de sable)	0%	1,4

Les amendements réalisés pour la culture de tomates pour la saison 2019-2020 sont :

Tableau 14 : Amendement de la saison 2019-2020 pour la culture de tomates de l'exploitation n°7

Nom de l'amendement	Quantité apportée (T/ha)	Estimation quantité azote (kg/ha)
Végéthumus (2,2-0,5-1)	6	132

Outils de travail du sol : sous-soleuse et un travail de surface a été réalisé.

Les engrais solubles utilisés pour la culture de tomates pour la saison 2019-2020 sont :

Tableau 15 : Engrais solubles de la saison 2019-2020 pour la culture de tomates de l'exploitation n°7

Nom de l'engrais soluble	Quantité apportée moyenne (kg/ha/semaine)	Estimation quantité azote (kg/ha)
Acide nitrique (58-0-0)	28,4	16,5
Nitrate de potasse (13-0-46)	53,7	7
Pekacid (0-60-20)	11,4	0
Sulfate de magnésie	28,3	0
Nitrate de chaux (15,5-0-0)	59,7	9,3
Chlorure de potasse (0-0-60)	26,7	0
Chlorure de calcium	21,2	0

Les prélèvements ont été effectués en culture de tomates dans le rang 121 de la serre 4.

3.1.8. Exploitation n°8

Cette exploitation est située à Avignon. Elle produit de la laitue, du melon et de la fraise sous abri plastique.

Tableau 16 : Caractéristique du sol n°8

Type de sol	Taux moyen de cailloux	Densité apparente
Limoneux fin (+calcaire) (24% d'argile, 57,8% de limon et 21,2% de sable)	0%	1,4

Aucune fumure de fond n'a été réalisée.

Outils de travail du sol : rouleuse, herse et un travail de surface ont été réalisés. Du 2 juin au 26 juin, 15 unités d'azote, 9 unités de phosphore et 23 unités de potassium ont été apportées au goutte-à-goutte par semaine avec des engrais minéraux.

Les prélèvements ont été effectués en culture de melons dans le troisième tunnel du bloc nord-est.

3.1.9. Exploitation n°9

Cette exploitation se situe à Saint Rémy-de-Provence, conduite en agriculture biologique. Elle produit des légumes diversifiés en été et en hiver dans une multi chapelle et tunnels plastique.

Tableau 17 : Caractéristique du sol n°9

Type de sol	Taux moyen de cailloux	Densité apparente
Limoneux (+calcaire) (18,9% d'argile, 39,5% de limon et 41,6% de sable)	0%	1,4

Les amendements réalisés pour la culture de poivrons pour la saison 2019-2020 sont :

Tableau 18 : Amendement de la saison 2019-2020 pour la culture de poivrons de l'exploitation n°9

Nom de l'amendement	Quantité apportée (T/ha)	Estimation quantité azote (kg/ha)
Tourteau de ricin (5-2-1,5)	9	450

Outils de travail du sol : sous-soleuse, bineuse et un travail de surface a été réalisé. Du Rise-P (*Bacillus amyloliquefaciens*) a été apporté le 29/05 et le 12/06.

Les prélèvements ont été effectués en culture de poivrons dans la chapelle D de la multi chapelle plastique.

3.1.10. Exploitation n°10

Cette exploitation est située à Chateaurenard, conduite en agriculture biologique. Elle produit des laitues et de la tomate et du concombre dans une serre verre. Les prélèvements ont été effectués en culture de tomates. La plantation a eu lieu le 26 mars.

Tableau 19 : Caractéristique du sol n°10

Type de sol	Taux moyen de cailloux	Densité apparente
Limoneux (+calcaire) (23,9% d'argile, 41% de limon et 35,1% de sable)	10%	1,5

Les 3 chapelles ont une stratégie de fertilisation différente :

- Chapelle 1 :

Les amendements réalisés pour la culture de tomates de la chapelle 1 pour la saison 2019-2020 sont :

Tableau 20 : Amendement de la saison 2019-2020 pour la culture de tomates de la chapelle 1 de l'exploitation n°10

Nom de l'amendement	Quantité apportée (T/ha)	Estimation quantité azote (kg/ha)
Crottin de cheval (0,54-0,26-0,57)	10	54
Richumus (1,8-0,5-0,7)	10	180
DCM Eco XTRA 1 (8-5-6)	2	160

Du petit lait de chèvre a également été apporté au goutte-à-goutte à 10 litres par hectare du 2 avril au 21 mai ainsi que de l'extrait fermenté d'ortie à 10 litres par hectare par semaine à partir du 2 mai jusqu'à fin de culture. De la phacélie a été semée entre les rangs à hauteur de 20kg/ha.

- Chapelle 2 :

Les amendements réalisés pour la culture de tomates de la chapelle 2 pour la saison 2019-2020 sont :

Tableau 21 : Amendement de la saison 2019-2020 pour la culture de tomates de la chapelle 2 de l'exploitation n°10

Nom de l'amendement	Quantité apportée (T/ha)	Estimation quantité azote (kg/ha)
DCM Eco XTRA 1 (8-5-6)	4	320

Du petit lait de chèvre a également été apporté au goutte-à-goutte à 10 litres par hectare du 2 avril au 21 mai ainsi que de l'extrait fermenté d'ortie à 10 litres par hectare par semaine à partir du 2 mai jusqu'à fin de culture. De la phacélie a été semée entre les rangs à hauteur de 20kg/ha.

- Chapelle 3 :

Les amendements réalisés pour la culture de tomates de la chapelle 3 pour la saison 2019-2020 sont :

Tableau 22 : Amendement de la saison 2019-2020 pour la culture de tomates de la chapelle 3 de l'exploitation n°10

Nom de l'amendement	Quantité apportée (T/ha)	Estimation quantité azote (kg/ha)
Bois broyé	20	NA
DCM Eco XTRA 1 (8-5-6)	2	160

Dans les 3 modalités, de la vinasse de betterave à 385 litres par hectare par semaine a été apportée du 25 mai au 11 juin puis à 231 litres par hectare par semaine à partir du 18 juin.

Dans les 3 modalités, un sous-solage, un travail de surface et un hersage ont été réalisés.

Les prélèvements de sol ont été réalisés en culture de tomates le 16 mai et le 15 juin pour les analyses de pH, Potentiel d'oxydoréduction, nitrates et conductivité ; et le 16 mai et le 2 juillet pour les analyses de stabilité structurale. Les prélèvements ont été effectués dans les chapelles 1, 2 et 3.

3.2. Analyses de sols

3.2.1. Prélèvement des échantillons de sol

Les échantillons ont été prélevés au centre des blocs d'abris cultivés. Ils ont été prélevés à l'aide d'une pelle sur 3 horizons différents : 0 à 10 cm, 10 à 20 cm et 20 à 30cm, à environ 15 cm du goutteur et 15 cm des plantes, en bordure du bulbe hydrique, zone où la prospection racinaire est possible. Les mottes utilisées pour les analyses de stabilité structurale proviennent des 3 horizons mélangés. Les prélèvements ont été réalisés le 29 mai et le 19 juin pour les analyses de pH, potentiel d'oxydoréduction, nitrates et conductivité ; et le 29 mai et le 2 juillet pour les analyses de stabilité structurale.

3.2.2. Mesure du pH et du potentiel d'oxydoréduction

Le pH et le potentiel d'oxydoréduction ont été mesurés selon la méthode d'Éric Petiot. Une masse de sol frais dans 2,5 masses d'eau déminéralisée ont été mélangées par renversement. En revanche, de l'eau du robinet a été utilisée car ayant un pH plus proche de la neutralité que l'eau déminéralisée trouvée dans le commerce. Ce mélange a été suivi d'une décantation de 30 minutes. Le pH et le potentiel d'oxydoréduction du surnageant ont été mesurés avec le pH-mètre compact et étanche avec électrode en alliage titane et gamme rédox HI991003 (Hanna Instruments) qui mesure ces deux paramètres simultanément.

3.2.3. Analyse de la conductivité

La conductivité a été mesurée à l'aide du conductivimètre HI 993310 (Hanna Instruments), elle est exprimée en mS/cm. Les échantillons de terres placés dans des sacs de congélation ont été humidifiés à l'aide d'eau déminéralisée afin de limiter la présence d'air dans l'échantillon. La présence d'air favorise une forte variabilité des valeurs mesurées. L'eau déminéralisée a une conductivité nulle (0 mS/cm). La mesure se fait par perforation par la sonde du sol directement dans le sac de prélèvement. Les sacs ont été perforés jusqu'à obtenir une valeur stable entre les différentes perforations (± 1 mS/cm).

3.2.4. Mesure des nitrates

La mesure des nitrates (NO_3^-) a été réalisée selon un protocole défini par l'APREL (Association Provençale de Recherche et Expérimentation en Légumes). Un volume de sol frais et un volume d'eau du robinet en poids ont été mélangés puis filtrés par filtration inverse à l'aide de filtre à café. La teneur en nitrates de l'eau du robinet a été soustraite à la teneur mesurée. L'appareil Nitrachek® a été utilisé, il mesure la quantité de nitrates en ppm à partir de la coloration de bandelettes réagissant aux nitrates.

La conversion de ppm en unités d'azote (kg/ha) se fait de la façon suivante :

$$N = C \times \frac{100 + H}{100 - H} \times \frac{14}{62} \times Da \times P \times 10 \times Tf$$

Avec : N = quantité d'azote de l'échantillon en kg/ha

C = concentration en NO_3^- mesurée en ppm

H = humidité de l'échantillon en %

14/62 = rapport permettant de calculer la masse de N dans NO_3 (masse atomique relative N/ 3*masse atomique O)

Da = densité apparente du sol

P = profondeur du prélèvement en m

Tf = taux de terre fine (= 1 - taux de cailloux)

Dans un souci pratique les tests sont réalisés sur les mêmes solutions de sol préparées pour la mesure du pH et du potentiel d'oxydoréduction. Pour cela de l'eau du robinet a été utilisée, car son pH est plus proche de la neutralité que l'eau déminéralisée trouvée dans le commerce. Les taux de nitrates en ppm de l'eau du robinet ont donc été mesurés et soustraits aux taux de nitrates obtenus dans les solutions de sol analysées.

3.2.5. Analyse de la stabilité structurale

La stabilité structurale a été évaluée avec le Slake Test. Cette méthode consiste à immerger des mottes de terre sèches d'environ 5 cm de diamètre dans des casiers contenant de l'eau claire. Le volume de la motte est observé toutes les minutes pendant 5 minutes. Toutes les minutes, les mottes sont replongées 5 fois successivement. S'il reste moins de 10% de volume, le test est terminé. S'il reste plus de 10% du volume de la motte, le test continue. Ce paramètre est estimé à l'œil nu. La stabilité est notée par classe de 1 à 6. La classe 1 correspond à une motte s'étant décomposée entre 0 et 1 minute et la classe 6 correspondant à une motte ayant résisté plus de 5 minutes. Les classes 1 et 2 correspondent à un sol très instable. Les classes 3 et 4 correspondent à un sol moyennement stable. Les classes 5 et 6 correspondent à un sol très stable. Huit mottes ont été analysées à chaque test.

4. Résultats et discussion

4.1. Amélioration du protocole

4.1.1. Analyse du pH

Lors de la mesure du pH et du potentiel d'oxydoréduction avec le pH-mètre décrit précédemment, certaines difficultés ont été rencontrées. En effet, lors de la première série de mesure une alcalinisation du pH a été observée. Ceci semble provenir de l'appareil ou de la méthode de mesure. Une solution exposée à l'air ambiant est supposée s'acidifier, car le CO₂ atmosphérique se dissout et combine avec l'eau pour former de l'acide carbonique (H₂CO₃). De plus, l'activité biologique dans la solution aurait pour effet d'abaisser le pH. En effet, ils produisent des acides organiques et/ou nitriques. Par ailleurs, les mesures ayant eu lieu en

extérieur, l'exposition au soleil a pu progressivement augmenter la température des échantillons analysés. Un écart entre la température de l'échantillon analysé et la température à laquelle a été réalisé l'étalonnage peut être une source de variabilité pour la mesure du pH. Des écarts de plusieurs dixièmes d'unité ont été observés lors de la mesure du pH d'une solution tamponnée à pH 7 et des écarts allant jusqu'à 0,5 unité ont été observés lors de la mesure répétée du même échantillon.

À la suite de ces observations, une série de mesure « test » a été réalisée en intérieur en conditions de températures stable. Les lectures du pH semblent plus stables, elles présentent des écarts allant jusqu'à 0,06 unité dans la solution tamponnée à pH 7 et jusqu'à 0,16 unité pour une eau de robinet testée, qui peut toutefois varier selon les ions présents (ions chlorures notamment). Cependant, un phénomène d'alcalinisation au cours du temps reste présent. Lorsque la sonde réalise la lecture des paramètres pH, de potentiel d'oxydoréduction et température un sablier apparaît en haut à gauche de l'écran de l'appareil puis celui-ci disparaît lorsque la mesure est stabilisée. Ce sont ces données stabilisées qu'il faut considérer. Ensuite une évolution des paramètres est notable après la disparition du sablier. Pour exemple, une eau du robinet présentant un pH de 7,36 lors de la disparition du sablier présente ensuite un pH de 7,18 en 6 minutes. De plus la solution tamponnée à pH 7 présente des écarts allant jusqu'à 0,08 unité lors de la disparition du sablier et ne présente plus aucun écart après 6 minutes de mesure. Cependant si la durée de mesure avait été prolongée le pH aurait pu continuer à évoluer. Les mesures ont été réalisées à température stable.

4.1.2. Test du protocole avec des terreaux dont les propriétés sont connues

Afin de tester le protocole, différents tests ont été réalisés. Deux terres ont été analysées en attendant 6 minutes lors de chaque mesure afin d'avoir une stabilisation de la mesure. Elles ont été testées dans des conditions de température stables. Chaque mesure a été répétée 3 fois pour chaque horizon. Dans ces conditions des valeurs de pH mesurées sont beaucoup plus stables, la plus grande différence observée est de 0,12 unité.

Le protocole utilisé ici est largement utilisé dans la littérature. Afin de tester celui-ci 2 terreaux commerciaux TERREAU REMPOTAGE commercialisé par BAOBAB de pH 5,8 et TERREAU PRO HORTICOLE commercialisé par FLORABELLAPRO de pH 6 ont été analysés. Les sacs de terreaux ont été conservés plusieurs mois après ouverture dans un cabanon à température ambiante. Quatre répétitions ont été réalisées par terreau, et un temps de stabilisation de 6 minutes a été respecté pour chaque mesure. Pour le TERREAU REMPOTAGE commercialisé par BAOBAB de pH 5,8 un pH moyen de 5,55 ($\pm 0,06$) a été observé et pour le TERREAU PRO HORTICOLE commercialisé par FLORABELLAPRO de pH 6 un pH moyen de 6,07 ($\pm 0,006$) a été observé. Ces résultats suggèrent que le protocole est efficace, mais présente une variabilité de quelques dixièmes d'unités pH. Le potentiel d'oxydoréduction de ces terreaux n'étant pas communiqué il n'a pas pu être possible de vérifier celui-ci. S'il existe des matières où il est communiqué, il serait intéressant de les tester.

Certains protocoles proposent de filtrer le surnageant par filtration inverse afin de limiter les impuretés et faciliter l'analyse par la sonde. Cette méthode a été testée et des différences allant jusqu'à 0,34 unité pH ont été observées après filtration inverse. Cependant l'effet de la filtration reste discutable et cette variation peut provenir du matériel (sonde), de la méthode de mesure ou des facteurs extérieurs comme les ondes électromagnétiques.

4.1.3. Test du protocole avec modification de certains paramètres

Une hypothèse quant à la variation du pH est que des particules de sol restent dans l'eau de rinçage et par conséquent sur la sonde ce qui influe sur le pH mesuré. Il a donc été testé de changer l'eau de rinçage entre chaque analyse. Les résultats ci-dessous ont été obtenus :

Tableau 33 : Résultats des analyses de sol avec et sans changement d'eau de rinçage.

Horizon	Changement d'eau de rinçage			Valeur de référence		
	pH	mV	°C	pH	mV	°C
0-10	7,21	202	22,8	7,18	202	22,7
10-20	7,3	196	22,8	7,28	194	22,7
20-30	7,3	188	22,8	7,3	191	22,7

mV : potentiel d'oxydoréduction (mV) ; °C : température (°C)

De très légères variations de pH de 0,03 unité maximum sont observées, de plus les valeurs de potentiel d'oxydoréduction semblent aussi peu impactées. L'effet de l'eau de rinçage sur les différences de pH observées est donc à écarter.

Une autre hypothèse est que l'appareil met plus de temps que ce qu'il affiche (avec le sablier) pour présenter une valeur stable. Il a donc été testé de réaliser des mesures de 6 minutes (valeur déterminée précédemment comme adéquate à la stabilisation de la valeur). Les résultats ci-dessous ont été obtenus :

Tableau 24 : Résultats des analyses de sol avec durée d'attente de 6 minutes pour chaque analyse

Horizon	6 minutes d'attente par mesure			Valeur de référence		
	ph	mV	°C	pH	mV	°C
0-10	7,54	164	22,8	7,18	202	22,7
10-20	7,67	154	22,3	7,28	194	22,7
20-30	7,67	136	22,9	7,3	191	22,7

mV : potentiel d'oxydoréduction (mV) ; °C : température (°C)

Des écarts élevés au niveau du pH et du potentiel d'oxydoréduction ont été observés. Une différence maximale de 0,39 unité pH est mise en évidence. De nettes différences au niveau du potentiel d'oxydoréduction sont également observées, mais celles-ci seront discutées plus loin. Ces résultats suggèrent donc que la sonde a besoin d'un certain temps en présence de la solution à tester pour se stabiliser. Néanmoins les mêmes tendances d'écarts entre les valeurs du pH et du potentiel d'oxydoréduction sont présentes.

Lors des séries d'analyses, les données ont été relevées dès la disparition du sablier, sans attendre la stabilisation des valeurs au bout de 6 minutes. Ceci afin d'être certain de visualiser l'effet de la profondeur au détriment de la stabilité de la valeur obtenue (pouvant varier de quelques dixièmes d'unité pH).

4.1.4. Réaction chimique entre l'eau et l'air

Une autre hypothèse serait que l'appareil utilisé est extrêmement sensible. La variation mesurée serait de réelles variations mesurées par la sonde. L'eau pourrait réagir avec l'oxygène pour former des ions hydroxydes (OH^-) qui alcaliniserait la solution ($\text{O}_2 + 2 \text{H}_2\text{O} + 4 \text{e}^- = 4 \text{OH}^-$). Eric petiot conseille d'utiliser la première valeur affichée afin de limiter la variation. Olivier Husson conseille des sondes moins sensibles.

L'alcalinisation apparente du pH serait potentiellement due à un temps de stabilisation de la sonde important ou à une évolution du pH de la solution due à la réaction entre l'oxygène et l'eau ($\text{O}_2 + 2 \text{H}_2\text{O} + 4 \text{e}^- = 4 \text{OH}^-$).

4.1.5. Analyse du potentiel d'oxydoréduction

Les ondes électromagnétiques et la température peuvent faire évoluer le pH et le potentiel d'oxydoréduction de la solution (Husson et al, 2016). Notamment les faibles fréquences de champs électromagnétiques de 2 kHz à 400 kHz (Husson et al, 2016).

De nombreuses difficultés sont associées à la détermination du potentiel d'oxydoréduction des sols. Celles-ci peuvent être dues à la variation induite par la méthodologie et les instruments de mesure (Rabenhorst et al, 2009). Il existe également une grande variation spatio-temporelle dans le sol notamment dans les sols où les conditions hydriques sont fluctuantes (Thomas et al, 2009). De plus, la respiration des microorganismes influe sur le potentiel d'oxydoréduction du sol et rend la lecture compliquée, car instable (Benada, 2009). Des déséquilibres chimiques peuvent influencer le potentiel d'oxydoréduction (Whitfield, 1974 ; Grundl, 1994). La température peut également provoquer des variations de potentiel d'oxydoréduction. Mais le problème majeur est que les faibles fréquences de champs électromagnétiques modifient les propriétés physicochimiques de l'eau, le potentiel d'oxydoréduction, le pH et la conductivité (Bessonova & Stas, 2008 ; Shatalov et al, 2010).

De plus l'heure solaire et la fluctuation journalières des rayonnements cosmo-telluriques provoqueraient une modification du potentiel d'oxydoréduction. Si les mesures ne sont pas réalisées à la même heure cela pourraient gêner la comparaison des valeurs mesurées. Par

conséquent, la mesure du potentiel d'oxydoréduction est difficile à reproduire et à interpréter et les résultats de différents auteurs sont difficiles à comparer.

Husson et al, (2016) ont montré une évolution incohérente du potentiel d'oxydoréduction au cours d'une même journée dans des solutions de sol plus ou moins concentrées. Quelle que soit la teneur en eau, les mesures de potentiels d'oxydoréductions ne sont pas stables et évoluent. Aussi, la respiration des microorganismes peut modifier le potentiel d'oxydoréduction de la solution.

4.1.6. Test de dynamisation

Lors des analyses une variation incohérente du potentiel d'oxydoréduction a été observée. Afin de mieux comprendre ce phénomène, des tests de dynamisation ont été effectués. Le pH et le potentiel d'oxydoréduction ont été mesurés toutes les 5 minutes pendant 30 minutes dans une eau du robinet traitée par adoucisseur et une eau déminéralisée agitées par rotation. Les résultats ci-contre ont été obtenus :

Tableau 25 : Résultats des tests de dynamisation de deux eaux : eau du robinet et eau déminéralisée du commerce

Temps	Eau du robinet			Eau déminéralisée		
	pH	mV	°C	pH	mV	°C
0	7,26	234	24,7	8,07	235	28,3
5	7,3	235	24,7	8,45	239	28,3
10	7,46	237	24,6	8,26	244	27,8
15	7,56	237	24,5	8,06	247	27,4
20	7,63	237	24,5	7,9	248	27,1
25	7,7	236	24,5	7,84	250	26,8
30	7,75	236	24,4	7,85	249	26,5

mV : potentiel d'oxydoréduction (mV) ; °C : température (°C)

Outre le phénomène d'alcalinisation du pH discuté précédemment, le potentiel d'oxydoréduction de l'eau du robinet reste stable pendant toute la durée du test tandis que celui de l'eau déminéralisée augmente progressivement. L'agitation de l'eau provoque une incorporation d'oxygène dans la solution, l'oxygène étant un puissant oxydant, il a pour effet de provoquer une augmentation du potentiel d'oxydoréduction. L'évolution observée avec l'eau déminéralisée semble cohérente, cependant aucune évolution n'est présente avec l'eau du robinet. Deux hypothèses s'offrent à nous, soit le potentiel d'oxydoréduction de l'eau du robinet a été influencé par l'effet des ondes électromagnétiques empêchant son évolution, soit l'évolution pour l'eau déminéralisée est due à l'influence des ondes électromagnétiques sur le potentiel d'oxydoréduction de l'eau. Une variation de température de l'eau déminéralisée peut également influencer sur les résultats. Néanmoins, aucune de ces hypothèses influence plus les résultats que la pratique de dynamisation elle-même qui n'a pas été réalisée avec suffisamment

d'énergie pour former un vortex puis un chaos par agitation inverse, cette fréquence devant être répétée plusieurs fois. Les données mesurées par la suite sont donc le résultat d'une agitation douce et non d'une réelle dynamisation.

4.1.7. Variabilité induite par la sonde

La sonde a également été placée dans une solution avec un potentiel d'oxydoréduction élevé (eau de piscine salée), la mesure du potentiel d'oxydoréduction est d'environ +480 mV. La sonde a affiché pendant environ une heure et demie des valeurs supérieures aux valeurs normalement affichées sur des échantillons de solution de sol préalablement testés. Cela indique que la sonde a besoin d'un certain temps pour se stabiliser également au niveau de potentiel d'oxydoréduction.

L'appareil de mesure de pH et potentiel redox utilisé dans cette étude ne permet pas un calibrage au niveau du potentiel d'oxydoréduction, celui-ci est configuré une seule fois en usine. Cependant la société qui commercialise cet appareil (Hanna Instruments®) commercialise également des solutions permettant de tester le potentiel d'oxydoréduction. Celles-ci ont pour référence HI7021L pour la solution à +240 mV et HI7022L pour la solution à +470 mV. L'utilisation de ces solutions peut permettre de vérifier la bonne lecture du potentiel d'oxydoréduction mais également de se rendre compte du temps de stabilisation nécessaire à l'appareil. Ces solutions n'ont pas été utilisées dans cette étude.

4.1.8. Amélioration de la mesure de potentiel d'oxydoréduction et de pH

Afin de pallier la variation induite par l'eau, Husson et al. (2016) suggèrent d'utiliser des échantillons de terre séchés et tamisés à 2 mm. La mesure doit être réalisée directement après l'humidification de l'échantillon jusqu'à la capacité au champ, c'est à dire 10 ml (pour les sols sableux) à 30 ml (pour les sols argileux) d'eau déminéralisée sont mélangés à 50 ml de terre sèche. L'électrode doit être nettoyée à l'eau déminéralisée claire entre chaque mesure et l'électrode en platine doit être nettoyée avec un papier abrasif puis rincée de nouveau. Toutes les 8 à 12 mesures la solution de potentiel d'oxydoréduction « tampon » doit être testée. La température et le pH doivent être mesurés sur le même échantillon de sol avec lequel a été mesurée le potentiel d'oxydoréduction.

Le pH de l'eau distillée est théoriquement de 7, cependant, il est extrêmement instable, car l'ajout de très faibles quantités d'ions peut le changer de façon importante. Pour cette raison, laissé à l'air libre et à température ambiante, le pH de l'eau distillée serait d'environ 5,4, car du CO₂ s'y dissout. Il faudra prendre en compte ce paramètre si de l'eau distillée est utilisée afin de limiter son exposition à l'air atmosphérique.

4.1.9. Analyse de la conductivité

Lors de la mesure de la conductivité, aucun problème n'a été rencontré. Cette analyse étant indépendante des autres, de l'eau déminéralisée a pu être utilisée. La conductivité de l'eau déminéralisée mesurée par le conductivimètre décrit précédemment est de 0 mS/cm. Elle n'a donc théoriquement aucune influence sur la conductivité de l'échantillon de sol analysé. Cependant elle augmente d'environ 2 % par °C (Heyley et al, 2007), il convient donc de réaliser toutes les analyses à la même température afin de limiter les biais. Les échantillons de sol ont été saturés en eau, dans ces conditions la conductivité est maximale, car le contact entre les particules de sol est maximal. La conductivité mesurée est dite chimique et donne un ordre de grandeur, elle est celle d'un milieu saturé en eau. Cependant, en conditions réelles, la conductivité est moindre que celle analysée selon ce protocole. En effet elle est influencée par la compaction et l'état hydrique principalement, mais également par la salinité, les nutriments et la texture du sol (Seladji et al, 2010 ; Paillet et al, 2010 ; Samouëlian et al, 2005).

4.1.10. Analyse de la stabilité structurale

Enfin, l'analyse de stabilité structurale avec la méthode du slake test est une méthode utilisée depuis plusieurs années et répandue dans les études agronomiques rapides. Elle présente des résultats fiables quant à la stabilité structurale. Néanmoins lors des analyses nous observons que les mottes de diamètre élevé semblent résister plus longtemps à l'immersion que les plus petites mottes. Cependant, d'après Tosello (2018) la taille des mottes n'est pas corrélée à la note du Slake test.

4.1.11. Influence du sol séché et tamisé

Généralement les analyses de sol sont effectuées avec du sol séché et tamisé à 2 mm. Cette pratique permet de connaître les valeurs chimiques des sols et donnent un ordre de grandeur, mais ne traduit pas les données réellement présentes dans le sol à un instant t. Nous avons utilisé du sol frais pour les analyses. Néanmoins, afin de comprendre si le séchage a un effet sur les résultats, nous avons répété les mesures sur les mêmes échantillons de sol après séchage. Les échantillons ont été séchés au four ménager à thermostat 2,5 (environ 70 °C) pendant environ 4 heures. Voici les résultats obtenus :

Tableau 26 : Analyse de sol frais et de sol sec

Exploitation	Horizon	Terre fraîche				Terre séchée			
		pH	mV	°C	mS/cm	pH	mV	°C	mS/cm
Exploitation n°10	chap1 0-10	6,7	231	22,6	0,58	6,61	263	25,5	0,57
	chap1 10-20	6,97	227	22,6	0,58	6,79	245	25,5	0,46
	chap1 20-30	7	230	22,6	0,55	6,84	240	25,5	0,62
Exploitation n°10	chap2 0-10	7,15	232	22,6	0,48	6,98	236	25,5	0,4
	chap2 10-20	7,11	233	22,6	0,46	7	234	25,5	0,39
	chap2 20-30	7,17	235	22,6	0,41	7,13	229	25,5	0,37
Exploitation n°10	chap3 0-10	7,07	239	22,6	0,52	7,09	230	25,5	0,47
	chap3 10-20	7,14	238	22,6	0,5	7,13	226	25,5	0,46
	chap3 20-30	7,23	238	22,6	0,45	7,19	223	25,5	0,34
Exploitation n°5	0-10	7,17	227	24,8	0,24	7,24	241	23,8	0,27
	10-20	7,18	222	24,8	0,27	7,28	236	23,8	0,35
	20-30	7,16	223	23	0,17	7,28	238	23,8	0,27
Exploitation n°9	0-10	7,12	185	22,4	0,43	7,13	193	25,3	0,39
	10-20	7,12	182	22,6	0,37	7,3	185	25	0,36
	20-30	7,26	178	22,6	0,42	7,24	181	25	0,35
Exploitation n°2	0-10	7,17	184	22,4	0,52	7,21	206	24	0,33
	10-20	7,3	177	22,6	0,35	7,37	200	24	0,25
	20-30	7,25	181	22,6	0,22	7,31	191	24	0,43
Exploitation n°4	0-10	7,45	241	23,7	0,3	7,09	216	22,9	0,24
	10-20	7,45	245	23,7	0,26	7,13	213	23	0,26
	20-30	7,48	247	23,7	0,25	7,19	209	22,9	0,26
Exploitation n°7	0-10	7,02	230	22,3	0,71	6,93	271	23,8	0,56
	10-20	7,03	232	22,3	0,69	6,95	269	23,8	0,55
	20-30	7,12	230	22,3	0,64	7,03	266	23,8	0,5
Exploitation n°6	0-10	7,11	197	22,5	0,3	6,92	227	23,9	0,28
	10-20	7,19	188	22,5	0,37	7,1	218	23,9	0,31
	20-30	7,22	190	22,5	0,42	7,14	213	23,9	0,32
Exploitation n°3	N-O 0-10	7,28	253	23,7	0,26	7,18	202	22,9	0,19
	N-O 10-20	7,29	252	23,7	0,23	7,24	202	22,9	0,22
	N-O 20-30	7,35	249	23,7	0,23	7,25	195	22,9	0,24
Exploitation n°3	centre 0-10	7,33	247	23,7	0,25	7,16	207	22,9	0,19
	centre 10-20	7,35	248	23,7	0,23	7,18	204	22,9	0,22
	centre 20-30	7,37	242	23,7	0,25	7,23	201	22,9	0,2
Exploitation n°8	0-10	7,26	215	22,7	0,36	7,18	202	22,7	0,3
	10-20	7,26	213	22,7	0,32	7,28	194	22,7	0,26
	20-30	7,3	210	22,7	0,3	7,3	191	22,7	0,28
Exploitation n°1	0-10	7,13	230	22,3	0,35	7,15	262	23,8	0,25
	10-20	7,22	228	22,3	0,27	7,28	254	23,8	0,24
	20-30	7,24	228	22,3	0,23	7,32	249	23,8	0,23

mV : potentiel d'oxydoréduction (mV) ; °C : température (°C) ; mS/cm : conductivité (mS/cm)

- Analyse du pH :

À quelques exceptions près, le pH, le redox et la conductivité sont sensiblement les mêmes avec la terre fraîche et la terre séchée. De légères variations sont présentes, cependant les mêmes tendances sont observées. Pour le pH cela peut se traduire par une évolution dans le temps de la solution : les microorganismes étant inactifs dans le sol séché le pH n'y serait pas modifié contrairement au sol frais qui serait impacté par l'activité microbienne et les réactions biochimiques. Une variabilité induite par la sonde, notamment au niveau du temps de stabilisation, peut également être responsable.

- Analyse du potentiel d'oxydoréduction :

Pour le potentiel d'oxydoréduction, celui-ci varie au cours d'une même journée et est également influé par différents paramètres cités précédemment, ce qui peut induire les variations observées. Cependant l'inactivité des microorganismes dans le sol séché peut induire une diminution du potentiel d'oxydoréduction, car l'oxygène, entre-autre, n'est plus consommé.

Néanmoins, ici les variations observées ne peuvent pas être seulement affectées au séchage des échantillons

- Analyse de la conductivité :

Pour la conductivité, les valeurs observées sont en majorité plus basses lorsque la terre est séchée. Une hypothèse serait que le sol séché serait moins dense que le sol frais, la conductivité augmentant avec la densité. Le séchage pourrait avoir pour effet de dissocier les colloïdes (Mohanty et al, 2015). Une autre hypothèse serait que les microorganismes auraient un impact sur la dégradation de molécules complexes et donc sur les valeurs de conductivité du sol. Leur inactivité diminuerait les valeurs de conductivité.

4.1.12. Discussion

- Mesures ex-situ :

Ces résultats suggèrent donc que l'utilisation de sol séché aurait peu d'impact sur la variation des valeurs mesurées. Les valeurs semblent donc sensiblement proches et leurs tendances, même légères, semblent conservées. Cependant que ce soit avec du sol frais ou du sol séché, la terre a été saturée en eau pour faire les mesures. La terre n'a pas la même disposition qu'en culture notamment au niveau de sa structure, de sa porosité et de son activité biologique. L'utilisation de terre fraîche ou séchée puis saturée en eau pour les mesures ne permettrait donc pas de connaître les valeurs réelles en cours de culture. Pour cela, il aurait fallu aussi mesurer les paramètres *in situ*, ce qui n'a pas été réalisé dans cette étude. Il serait intéressant par ailleurs de comparer les tendances de valeurs entre les horizons de sol avec des mesures *in-situ* et *ex-situ*. La méthode *ex-situ* permet de connaître les valeurs chimiques et donner un ordre de grandeur.

- Mesures in-situ :

Pour travailler *in-situ* des appareils de mesure semblent adaptés :

Pour le pH, Olivier Husson suggère d'utiliser le pH-mètre PH100 Exstick de chez EXTECH utilisable directement sur le sol.

Pour le potentiel d'oxydoréduction, des sondes non combinées (anode et cathode séparées) proposeraient des mesures plus précises que la bi-sonde utilisée actuellement. Olivier Husson utilise le pH-mètre portable 3110, appareil seul, WTW avec comme électrode de référence REF321-9, corps verre, Ag/AgCl, remplissable, tête à vis, T°-5 à +60°C, HACH®. L'électrode métallique utilisée en plein champ n'est pas mentionnée. Pour les analyses de solution de sol l'électrode métallique M241Pt Radiometer Analytical (capteur à plaque de platine) est utilisée.

Enfin pour la conductivité le WET SENSOR peut être utilisé directement en sol, il apportera en plus de la mesure de la conductivité du sol, la mesure de la conductivité des pores.

4.1.13. Evolution du protocole :

Aux vues des éléments cités précédemment, une amélioration du protocole utilisé dans notre étude peut être proposé avec les mêmes outils techniques et du matériel additionnel peu coûteux.

- Pour la mesure du pH et du potentiel d'oxydoréduction :

-Utiliser de l'eau distillée avec un pH le plus neutre possible. De plus l'absence de nitrate dans l'eau distillée faciliterais la mesure des nitrates sur la même solution de sol.

-Réaliser les mesures dans le même lieu, si possible dans la même plage horaire et exposé le moins possible aux ondes électromagnétiques (wifi, appareils électriques branchés, ...).

-Avant toute mesure, après le calibrage du pH, la vérification de la mesure du potentiel d'oxydoréduction doit être réalisée dans les solutions test.

-Pour la mesure du potentiel d'oxydoréduction, faire la mesure directement après l'ajout d'eau afin de limiter les variations induites sur l'eau par les ondes électromagnétiques.

-Dès que la valeur est stable pendant une minute, noter la mesure.

-Rincer la sonde à l'aide d'une pissette d'eau distillée au-dessus d'un récipient entre chaque mesure.

-Toute les 8 à 12 mesures, vérifier la lecture du potentiel d'oxydoréduction dans la solution connue.

-La mesure du pH peut être prise en même temps que le potentiel d'oxydoréduction, mais doit être répétée après 30 minutes de décantation

-La température doit être relevée à chaque mesure.

- Pour l'analyse de la stabilité structurale :

D'après Tosello (2018), il n'y a pas de corrélation entre la taille des mottes et la note de slake test, mais il y semble y avoir un effet de la texture du sol sur la note de slake-test. La texture du sol et la structure des mottes prélevées pour l'analyse pourraient avoir un effet sur la note de Slake-test ce qui inclurait un biais dans l'analyse des données.

- Pour la conductivité et le taux de nitrates :

Aucune amélioration (avec le matériel à notre disposition) n'est nécessaire.

La méthode actuellement utilisée est très efficace pour les nitrates, la conductivité et la stabilité structurale. Même si certaines variations de pH sont observées, la valeur mesurée reste fiable. Cependant la mesure du potentiel d'oxydoréduction semble instable, car les valeurs observées semblent répondre à différents éléments extérieurs. De plus il est important de rappeler que

pour la conductivité et le potentiel d'oxydoréduction ce sont des valeurs chimiques qui sont mesurées et elles ne reflèteraient pas exactement les valeurs en culture.

4.2. Résultats de l'exploitation n°1

4.2.1. Évolution du pH, du redox, de la teneur en nitrates et de la conductivité

Tableau 27 : Évolution du pH, du redox, de la teneur en nitrates et de la conductivité du 29 mai au 19 juin sur l'exploitation n°1

Horizon	Prélèvement : 29 Mai					Prélèvement : 19 Juin				
	pH	mV	ppm	Unité d'azote	mS/cm	pH	mV	ppm	Unité d'azote	mS/cm
0-10	6,94	229	25,5	25	0,39	7,13	230	26	31	0,35
10-20	7,06	229	47	45	0,42	7,22	228	24,5	29	0,27
20-30	7,2	224	18,5	18	0,47	7,24	228	17	20	0,23

mV : potentiel d'oxydoréduction (mV) ; ppm : taux de nitrates (ppm) ; mS/cm : conductivité (mS/cm)

Le pH augmente avec la profondeur et cette tendance est conservée du 29 mai au 19 juin. Les valeurs de pH sont légèrement alcalines, laissant potentiellement les familles de micro-organismes s'exprimer.

Cependant le potentiel d'oxydoréduction est stable en surface et est inversé en profondeur le 29 mai, puis stable sur les 3 horizons le 19 juin. Celui-ci a peu évolué au cours du temps. Cela peut être dû au fait que le sol est tassé et manque d'aération ou que l'activité microbienne est faible. Le manque d'activité microbienne peut être dû à l'apport d'engrais minéral au goutte-à-goutte.

Les quantités d'azote sont faibles, mais constantes dans le temps, car un apport journalier est réalisé. Le 29 mai une augmentation de la concentration en nitrates dans l'horizon 10-20 est présente. Cela suggère que les nitrates ne sont pas totalement absorbés dans l'horizon 0-10 et qu'ils sont lessivés vers les horizons inférieurs. Cela peut également traduire une minéralisation plus forte du compost de déchets verts dans l'horizon 10-20, ce qui suggère que l'activité microbienne y est plus forte, sûrement à cause de l'enfouissement du compost de déchets verts. Le 19 juin l'azote diminue convenablement avec la profondeur, le système racinaire est sûrement plus développé et assure une meilleure absorption où la répartition des microorganismes est modifiée et plus présente en surface, l'oxygène en profondeur étant alors en partie consommé.

La conductivité est inversée le 29 mai ce qui peut confirmer l'hypothèse du lessivage et de l'activité microbienne plus élevée en profondeur (qui dégrade des molécules non solubles en molécules solubles influant sur la conductivité). Cela peut également traduire une compaction du sol. Le 19 juin, la conductivité diminue avec la profondeur sûrement à cause d'une meilleure absorption racinaire et un déplacement des populations de microorganismes.

- Proposition d'amélioration.

Afin d'améliorer les valeurs de potentiel d'oxydoréduction trop rapprochées entre les horizons, il conviendrait de poursuivre les apports d'amendements organiques, d'apporter des extraits fermentés et de réaliser une couverture vivante du sol (Petiot, 2014).

4.2.2. Test de stabilité structurale

Tableau 28 : Résultats du test de stabilité structurale (Slake Test) sur l'exploitation n°1

Date de prélèvement	N° échantillon								Moyenne
	1	2	3	4	5	6	7	8	
29 Mai	6	4	4	4	4	4	5	5	4,5
2 Juillet	3	3	6	6	6	6	1	2	4,1

Les mottes contenaient des racines. Lors des analyses un phénomène d'effervescence est apparu et une « écume » s'est formée à la surface. Les mottes se sont rapidement désagrégées et l'eau est devenue trouble. De la terre s'est vite accumulée au fond du bac. Le centre des mottes est resté sec et compact.

Les moyennes obtenues traduisent un sol moyennement stable proche d'un sol très stable. En cours de culture une légère perte de stabilité a eu lieu. Avant la culture, le compost de déchets verts et l'Humi-activ ont stimulés l'activité et la diversité microbienne ce qui a permis une bonne structuration du sol. Cependant les apports d'engrais en cours de culture n'ont pas stimulé leur activité et la population et la diversité a probablement chuté. L'activité de structuration du sol a diminué ce qui expliquerait la perte de stabilité structurale au 2 juillet. Le sol contient 48,2% de limon, la formation des mottes peut, en grande partie, être due au travail du sol. Les sols limoneux possèdent une bonne mémoire du travail du sol qui crée une structure plus durable (Roisin).

4.3. Résultats de l'exploitation n°2

4.3.1. Évolution du pH, du redox, de la teneur en nitrates et de la conductivité

Tableau 29 : Évolution du pH, du redox, de la teneur en nitrates et de la conductivité du 26 mai au 17 juin sur l'exploitation n°2

Horizon	Prélèvement : 26 Mai					Prélèvement : 17 Juin				
	pH	mV	ppm	Unité d'azote	mS/cm	pH	mV	ppm	Unité d'azote	mS/cm
0-10	7,87	170	77,5	99	0,59	7,17	184	46,5	66	0,52
10-20	7,95	170	46	59	0,44	7,3	177	36	51	0,35
20-30	8,08	164	31	40	0,32	7,25	181	48,5	69	0,22

mV : potentiel d'oxydoréduction (mV) ; ppm : taux de nitrates (ppm) ; mS/cm : conductivité (mS/cm)

Le pH augmente avec la profondeur ce qui traduit un sol sain. Cette tendance est conservée entre le 26 mai et le 17 juin, mais une acidification du milieu est présente. Celle-ci peut être due à l'activité des microorganismes qui ont acidifié le sol ou au développement de la culture.

Cependant, le 26 mai le potentiel d'oxydoréduction est stable et diminue à l'horizon 20-30. Le 17 juin, celui-ci a légèrement augmenté et diminue de l'horizon 0-10 à 10-20, mais augmente à l'horizon 20-30. Ceci peut être dû à un tassement du sol et peut être à des conditions anoxiques conduisant à la fermentation méthane le 26 mai. La culture a probablement légèrement oxydé le sol en se développant.

Les quantités de nitrates diminuent avec le temps et la profondeur. Elles ne sont pas excessives. Cela traduit une minéralisation du compost de fumier de cheval par la flore du sol. Il y a moins de nitrates mesurés le 17 juin, car l'absorption augmente par rapport au 26 mai en vue des besoins de la culture et la minéralisation. Les valeurs restent correctes. Il est possible que les composés les plus simples aient été dégradés et qu'il ne reste que des composés plus complexes, plus long à dégrader ce qui diminue la vitesse de minéralisation. Le 17 juin, à l'horizon 20-30 une accumulation de nitrates est présente, ceci peut être dû à un phénomène de lessivage. Aux vues de l'augmentation du potentiel d'oxydoréduction à cet horizon il est probable que l'activité microbienne y soit supérieure à celle de l'horizon 10-20, ce qui traduirait une minéralisation plus importante dans cet horizon. La perte d'activité à l'horizon 10-20 est probablement due à un tassement du sol induit par le travail du sol et/ou le passage d'engin sur sol humide. Ce phénomène n'était pas présent le 26 mai, le passage d'engin sur sol humide est donc le plus probable, mais l'effet a pu être masqué par d'autres paramètres le 26 mai. Aussi, un sol limoneux travaillé finement avant plantation a tendance à naturellement se tasser avec le temps, notamment en lien avec les apports importants d'eau d'irrigation.

La conductivité est correcte le 26 mai et le 17 juin, elle conserve la même tendance, mais a légèrement diminué le 17 juin probablement à cause de l'absorption plus forte des ions à ce stade de la culture.

- Propositions d'amélioration.

Afin d'améliorer le potentiel d'oxydoréduction rapproché, il conviendrait d'injecter au goutte-à-goutte des extraits fermentés et de réaliser une couverture vivante du sol (Petiot, 2014).

4.3.2. Test de stabilité structurale

Tableau 30 : Résultats du test de stabilité structurale (Slake Test) sur l'exploitation n°2

Date de prélèvement	N° échantillon								Moyenne
	1	2	3	4	5	6	7	8	
26 Mai	3	6	1	1	1	3	3	6	3
30 Juin	5	6	6	3	6	6	6	6	5,5

Les mottes contenaient un peu de racines des bouts de bois et des parties noires (peut-être du compost de fumier de cheval ?). Le 26 mai les mottes s'effritaient rapidement alors que le 30 juin ce phénomène avait diminué. Une légère écume était présente à la surface de l'eau. Les mottes ayant résisté présentaient un centre sec et compact.

La moyenne obtenue le 26 mai traduit un sol moyennement stable, à la limite de l'instable. Celle-ci a évolué, le 30 juin vers un sol très stable. Le sol est très limoneux, les mottes sont probablement issues du travail du sol. Les sols limoneux possèdent une bonne mémoire du travail du sol, le travail du sol crée donc une structure plus durable (Roisin). Le compost de fumier de cheval apporté avant la culture a probablement stimulé l'activité. Le 26 mai, l'activité biologique était encore probablement faible, mais a rapidement augmentée. Elle semble avoir fortement amélioré la stabilité structurale des mottes créées par le travail du sol et/ou en créées de nouvelles. Aucune fertirrigation n'a été apportée donc le compost de fumier de cheval est le seul facteur d'influence.

4.4. Résultats de l'exploitation n°3

4.4.1. Évolution du pH, du redox, de la teneur en nitrates et de la conductivité

Tableau 31 : Évolution du pH, du redox, de la teneur en nitrates et de la conductivité du 26 mai au 17 juin dans le bloc Nord-Ouest et le bloc centre sur l'exploitation n°3

Bloc Nord-Ouest										
Horizon	Prélèvement : 28 Mai					Prélèvement : 18 Juin				
	pH	mV	ppm	Unité d'azote	mS/cm	pH	mV	ppm	Unité d'azote	mS/cm
0-10	7,48	223	48	40	0,22	7,28	253	34	28	0,26
10-20	7,44	229	93,5	77	0,24	7,29	252	47,5	39	0,23
20-30	7,53	228	42	51	0,21	7,35	249	41	34	0,23

Bloc centre										
Horizon	Prélèvement : 28 Mai					Prélèvement : 18 Juin				
	pH	mV	ppm	Unité d'azote	mS/cm	pH	mV	ppm	Unité d'azote	mS/cm
0-10	7,52	223	98	81	0,3	7,33	247	51	42	0,25
10-20	7,2	236	233,5	193	0,53	7,35	248	65	54	0,23
20-30	7,32	229	134	127	0,52	7,37	242	52	43	0,25

mV : potentiel d'oxydoréduction (mV) ; ppm : taux de nitrates (ppm) ; mS/cm : conductivité (mS/cm)

Dans le bloc nord-ouest et le bloc centre, le 28 mai, le pH diminue de l'horizon 0-10 à 10-20 puis augmente à l'horizon 20-30. Cela peut se traduire par un manque d'activité

microbienne en surface. Le 18 juin, le pH augmente faiblement avec la profondeur. Il s'est remis dans le bon sens au cours de la culture, mais les valeurs sont très proches. Cela est difficile à expliquer, car des engrais minéraux ont été apportés en fertirrigation. L'activité biologique semble peu stimulée.

Le potentiel d'oxydoréduction, la teneur en nitrates et la conductivité suivent les mêmes tendances que le pH dans les deux tunnels le 28 mai ce qui confirmerait une activité plus faible en surface.

La teneur en nitrates est supérieure dans le bloc centre ainsi que la conductivité. La conductivité, ici, est probablement expliquée par les nitrates. Il y a un historique d'apport d'amendement de type compost de déchet vert. Il est possible que la quantité de nitrates soient plus forte dans le bloc centre car liée à la minéralisation des composts. Une différence d'activité biologique est à écarter, car les potentiels d'oxydoréduction sont sensiblement les mêmes. Le fait que l'activité biologique soit supérieure à l'horizon 10-20 (ce qui entraîne une minéralisation et une disponibilité de l'azote supérieure) est sûrement dû à l'enfouissement du guanhumus.

Le 18 juin, dans le bloc nord-ouest et le bloc centre, le pH a légèrement diminué et augmente progressivement avec la profondeur, cela peut traduire une activité microbienne légère. Les valeurs sont toutefois très proches, ce qui mettrait en évidence un manque d'activité.

Le potentiel d'oxydoréduction a augmenté, ceci est probablement dû à l'oxydation induite par la culture qui aurait été supérieure à la réduction induite par la respiration des microorganismes. Il augmente de l'horizon 0-10 à 10-20 mais diminue à l'horizon 20-30 ce qui est probablement dû au tassement du sol à cet horizon.

Les teneurs en nitrates ont diminué, mais conservent leur tendance. Ceci est probablement dû à l'enfouissement de guanhumus et de compost de déchets verts. L'augmentation des populations microbiennes citée précédemment est probablement due à un autre facteur que le guanhumus. Il est possible qu'elle ne joue pas un rôle dans la minéralisation de l'azote. Les teneurs en nitrates ayant fortement diminué il est probable que la minéralisation du guanhumus et du compost soit plutôt rapide ou que les microorganismes impactés dans la minéralisation ont diminués suite à l'apport d'engrais minéral 15-10-30 de fertirrigation. Dans le bloc nord-ouest, la conductivité diminue de l'horizon 0-10 à 10-20, mais n'évolue pas à l'horizon 20-30. Dans le bloc centre elle suit la même tendance, mais augmente légèrement en 20-30. Ces résultats confirment l'évolution de la répartition des microorganismes dans le temps et le compactage de l'horizon 20-30.

- Propositions d'amélioration.

Afin d'améliorer le potentiel d'oxydoréduction rapproché, il conviendrait de poursuivre les apports d'amendements organiques, d'apporter des extraits fermentés et de réaliser une couverture vivante du sol (Petiot, 2014). Pour la conductivité trop rapprochée, il faudrait apporter de la montmorillonite qui favorise les échanges dans le sol ; apporter des fumures lorsque les températures sont inférieures à 12 °C (qui vont produire des formes d'azotes fournissant un substrat viable pour les microorganismes) ; éviter les compactages en ne

travaillant pas sur des sols humides et en pratiquants des décompactages ; stimuler l'activité microbienne en apportant des extraits fermentés (Petiot, 2014).

4.4.2. Test de stabilité structurale

Tableau 32 : Résultats du test de stabilité structurale (Slake Test) dans le bloc Nord-Ouest et le bloc centre sur l'exploitation n°3

Bloc Nord-Ouest									
N° échantillon									
	1	2	3	4	5	6	7	8	
Date de prélèvement	Classes								Moyenne
28 Mai	2	2	2	1	6	3	1	6	2,9
30 Juin	4	1	3	5	6	6	5	3	4,1

Bloc centre									
N° échantillon									
	1	2	3	4	5	6	7	8	
Date de prélèvement	Classes								Moyenne
28 Mai	2	1	6	4	4	2	1	6	3,2
30 Juin	1	2	2	1	1	5	2	2	2

Les mottes contenaient des racines, des petits cailloux et de la matière organiques (bois, brindilles). Lors des tests les mottes se désagrégeaient à vue d'œil, l'eau devenait vite trouble et de l'écume se formait à la surface. Les mottes ayant résisté au test présentaient un centre sec et compact.

Dans le bloc nord-ouest, le 28 mai, la moyenne obtenue traduit un sol instable proche du moyennement stable et évolue le 30 juin vers un sol moyennement stable. Cette amélioration de la stabilité est difficile à expliquer aux vues de la stratégie de fertilisation du producteur qui a apporté des engrais minéraux au goutte-à-goutte qui diminuent les populations des microorganismes. Il est probable que, comme cité dans la partie précédente, les populations de microorganismes aient augmenté, mais que celles-ci n'ont pas d'impact sur la minéralisation, mais plutôt sur la stabilité structurale du sol.

Dans le bloc centre, le 28 mai la moyenne obtenue traduit un sol moyennement stable et évolue le 30 juin vers un sol instable. Cette perte de stabilité est probablement due à l'apport d'engrais minéral au goutte-à-goutte qui a pour impact de diminuer les populations et la diversité de microorganismes du sol en les privant de substrat. Par ailleurs, ce sol étant dernièrement solariser (technique de désinfection solaire su sol), les agrégats du sol ont pu se disloquer, avec la perte d'activité biologique du sol induite par cette pratique.

Le travail du sol important et l'apport d'engrais minéral au goutte-à-goutte sur le long terme sont probablement les facteurs traduisant une faible stabilité structurale sur cette exploitation.

4.5. Résultats de l'exploitation n°4

4.5.1. Évolution du pH, du redox, de la teneur en nitrates et de la conductivité

Tableau 33 : Résultat des analyses de pH, redox, nitrates et conductivité dans 3 chapelles sur l'exploitation n°4

Date de prélèvement	Chapelle	Horizon	pH	mV	ppm	Unité d'azote	mS/cm
13 Janvier	1	0-10	8	192	64,5	61	0,35
13 Janvier	1	10-20	8,08	196	133	126	0,56
13 Janvier	1	20-30	8,21	195	106	100	0,46
8 Avril	1	0-10	6,73	245	166	157	0,68
8 Avril	1	10-20	6,91	257	57,5	54	0,63
8 Avril	1	20-30	7,03	261	75	71	0,53
8 Avril	2	0-10	6,66	271	88,5	84	0,55
8 Avril	2	10-20	6,9	279	91,5	86	0,57
8 Avril	2	20-30	7,01	279	75	71	0,51
26 Mai	1	0-10	7,26	234	22,5	16	0,37
26 Mai	1	10-20	7,23	235	34,5	24	0,49
26 Mai	1	20-30	7,32	231	19	13	0,49
26 Mai	2	0-10	7,26	232	49,5	34	0,63
26 Mai	2	10-20	7,4	227	31	22	0,42
26 Mai	2	20-30	7,4	228	29,5	21	0,46
18 Juin	5	0-10	7,45	241	14,5	11	0,3
18 Juin	5	10-20	7,45	245	40,5	31	0,26
18 Juin	5	20-30	7,48	247	43,5	33	0,25

mV : potentiel d'oxydoréduction (mV) ; ppm : taux de nitrates (ppm) ; mS/cm : conductivité (mS/cm)

- Mesures de départ

Avant la culture, en date du 13 janvier, le pH était alcalin et augmentait avec la profondeur. L'activité biologique diminuait donc convenablement avec la profondeur, même si les valeurs de pH sont toutefois très élevées. Le fait que le pH soit alcalin peut se traduire par une faible activité microbiologique du sol induit par des températures basses.

Le potentiel d'oxydoréduction était bas et augmentait de l'horizon 0-10 à 10-20 puis se stabilisait en 20-30. Le faible potentiel d'oxydoréduction traduit une faible présence de microorganismes. Leur présence augmente sur les 2 premiers horizons puis se stabilise en profondeur, ceci est probablement dû au compactage du sol induit par le travail du sol.

La teneur en nitrate augmente de l'horizon 0-10 à 10-20 puis diminue à l'horizon 20-30. Il y a probablement eu un lessivage des nitrates de l'horizon de surface vers les horizons inférieurs, en effet la culture étant absente les nitrates ne sont pas absorbés en surface.

La conductivité augmente de l'horizon 0-10 à 10-20 puis diminue en 20-30. Elle est inversée dans les 2 premiers horizons, cela est probablement dû au lessivage des nitrates, mais aussi d'autres éléments solubles.

- Chapelle 2 (témoin) :

Le 8 avril le pH a fortement diminué, cela traduit une augmentation de l'activité biologique, mais également le développement de la culture. En effet, l'apport de fumier de mouton et d'engrais organique a probablement stimulé l'activité biologique du sol. De plus la mise en place de la culture favorise l'installation de microorganismes dans la rhizosphère. Le pH augmente convenablement avec la profondeur ce qui signifie que le sol est sain et que la concentration en microorganismes diminue avec la profondeur. Le 26 mai, le pH a augmenté ce qui peut traduire une perte d'activité biologique. Il est possible que la dégradation de l'engrais organique et du fumier soit terminée ou très avancée et que les populations de microorganismes, n'ayant pas été stimulées par des apports, aient diminué. Le pH augmente entre l'horizon 0-10 et 10-20 puis se stabilise en 20-30. Il est possible qu'en 20-30 l'activité biologique diminue sous l'effet de la compaction du sol.

Le 8 avril, le potentiel d'oxydoréduction a fortement augmenté, ce phénomène est probablement dû à la saison. Le potentiel d'oxydoréduction augmente de 0-10 à 10-20 puis se stabilise en 20-30. Il a donc une diminution de la population de microorganismes entre les deux premiers horizons puis une stabilisation. Cela peut être dû à un tassement du sol. Cela peut induire une fermentation des méthanes. Le 26 mai, le potentiel d'oxydoréduction a diminué ce qui indiquerait une activité biologique, cependant, cela va en contradiction avec les résultats de l'évolution du pH, il est possible qu'un autre facteur ait joué. La culture, le 26 mai, était attaquée par de la fusariose, il est possible que la respiration de ce champignon ait diminué le potentiel d'oxydoréduction et que sa présence a fortement diminué la présence d'autres microorganismes, notamment les bactéries qui acidifient le sol, en affaiblissant le système racinaire des plantes. Le potentiel d'oxydoréduction est plutôt stable sur les 3 horizons. Cela traduit un sol malade. La présence de fusariose en grande quantité sur les 3 horizons est probablement la cause de cette homogénéité, un tassement du sol en profondeur peut également avoir un impact.

La teneur en nitrate est moyenne le 8 avril, elle augmente légèrement de l'horizon 0-10 à 10-20 puis diminue en 20-30. Il est probable que l'absorption racinaire n'est pas totalement efficace en surface et qu'il y ait un lessivage vers l'horizon inférieur. Le 26 mai, les teneurs en nitrates ont chuté et sont plutôt faibles cela peut résulter d'un arrêt de la minéralisation du fumier par une forte perte de microorganismes. La dégradation de l'engrais organique qui dure de 100 à 150 jours est probablement terminée.

La conductivité, le 26 mai, augmente de l'horizon 0-10 à 10-20 puis rediminue en 20-30. Elle est inversée. Cela peut être corrélé aux nitrates où la population de microorganismes peut être inversée à cause de la compaction du sol. Elle diminue convenablement en profondeur, ce qui signifie que dans l'horizon 20-30 il y a moins de microorganismes. Le 26 mai, la conductivité de l'horizon 0-10 a augmenté alors que les nitrates ont diminué. Cela est compliqué à expliquer, le sol est malade il est possible que l'attaque de fusariose dégage des composés solubles. Il est également possible que l'absorption racinaire soit fortement diminuée voire stoppée et que des composés autres que les nitrates normalement absorbés par la plante s'accumulent dans cet

horizon. La conductivité diminue à l'horizon 10-20 et augmente à l'horizon 20-30. L'augmentation peut être due à un tassement de l'horizon 20-30.

- Chapelle 1 (essai) :

Le 8 avril le pH suit la même tendance que le témoin et est du même ordre de grandeur. Le vinaigre blanc et la vinasse de betterave apportés précocement ne semblent pas avoir d'effet sur le pH alors qu'ils devraient stimuler l'activité microbienne et acidifier le sol, car ce sont des composés acides. Le 26 mai, le pH est du même ordre de grandeur que le témoin à l'horizon 0-10 puis il augmente progressivement avec la profondeur. Il semble que la population microbienne soit supérieure par rapport au témoin. Le petit lait de chèvre et les extraits fermentés d'orties puis de céréales semblent stimuler l'activité. Ils semblent également avoir pour effet d'acidifier le sol. De plus la couverture végétale prévue (lotier corniculé) ne s'est pas développée et donc n'a pas aidé à l'évolution des paramètres. Il est donc probable que l'effet observé soit en lien avec les intrants. De plus, malgré l'attaque de fusariose, la population microbienne semble s'être maintenue contrairement au témoin.

Le potentiel d'oxydoréduction, le 8 avril, est plus faible que le témoin, ce qui signifie qu'il y a une augmentation de l'activité microbienne. Cependant il est possible que ce résultat ne soit pas lié à l'activité microbienne, mais à l'extrait fermenté d'ortie qui a pour effet de réduire le milieu. Cependant, le potentiel d'oxydoréduction augmente convenablement avec la profondeur (contrairement au témoin qui est stable) ce qui signifie que l'activité biologique est bien répartie dans ce sol. L'apport combiné des intrants a pu avoir un effet bénéfique sur les microorganismes. Le 26 mai, le potentiel d'oxydoréduction a légèrement diminué, mais il est du même ordre de grandeur que le témoin, cela est sûrement dû à l'attaque de fusariose qui vient lisser le potentiel d'oxydoréduction malgré la stimulation de l'activité biologique par le petit lait de chèvre et les extraits fermentés. Le potentiel d'oxydoréduction évolue peu avec la profondeur comme le témoin, sûrement à cause de l'attaque de fusariose très avancée.

Le 8 avril, les teneurs en nitrates sont 2 fois supérieures à l'horizon 0-10 que le témoin. Cela indique que la minéralisation de la fumure et de l'engrais organique est meilleure. Cela grâce à l'apport de petit lait de chèvre et d'extrait fermenté d'orties qui viennent stimuler l'activité biologique du sol. Cependant la teneur en nitrates diminue de moitié à l'horizon 10-20 où elle est inférieure au témoin, cela peut signifier que le petit lait et les extraits fermentés stimulent l'activité en surface et pas en profondeur, ce qui est attendu. En profondeur le taux de nitrate est le même que le témoin. Le 26 mai, le taux de nitrates est inférieur au témoin, il est possible que l'attaque de fusariose ait complètement stoppé la minéralisation. La teneur en nitrates augmente de l'horizon 0-10 à 10-20, il est possible que l'absorption racinaire ait fortement diminué voir s'est arrêtée en surface ce qui provoque un lessivage vers l'horizon 10-20. A l'horizon 20-30 le taux de nitrates diminue et est très bas, cela peut être dû à la compaction qui empêche le lessivage vers cet horizon.

Le 8 avril, la conductivité est supérieure au témoin ce qui montre que les intrants utilisés ont stimulé l'activité biologique. De plus, contrairement au témoin, la conductivité diminue

convenablement avec la profondeur ce qui montre une nouvelle fois l'effet bénéfique des intrants utilisés sur l'activité biologique du sol. Le 26 mai, la conductivité a fortement baissé en surface, cela peut être lié à l'arrêt de l'activité biologique dans cet horizon à cause de l'attaque de fusariose. Elle diminue à l'horizon 10-20 et reste stable en 20-30. Contrairement au témoin elle n'augmente pas avec la profondeur, mais reste stable ce qui montre une certaine résilience de cette modalité grâce à la stimulation des microorganismes même en présence de fusariose.

Même en stimulant l'activité biologique du sol pour induire des conditions favorables pour la culture, cette modalité n'a pas mieux résisté à l'attaque de fusariose que la modalité témoin. Afin de mieux visualiser l'effet des intrants et de la couverture végétale, il conviendrait de répéter cette expérimentation en absence de fusariose.

- Chapelle 5 (culture de tomates) :

Cette modalité n'est pas comparable avec les autres, car elle a été réalisée sur une culture différente dans une chapelle différente. En effet chaque culture a un effet différent sur son sol, de par sa configuration racinaire ou les microorganismes spécifiques à chaque espèce dans leur rhizosphère. Le pH était plutôt élevé ce qui traduit une faible présence des microorganismes et était stable de l'horizon 0-10 à 10-20 puis augmentait légèrement à l'horizon 20-30. Cela traduit une répartition égale des microorganismes dans les 2 premiers horizons et une faible diminution en profondeur. La population est sûrement faible et n'a pas d'effet très prononcé. Le potentiel d'oxydoréduction augmente légèrement avec la profondeur, mais les valeurs sont très peu différentes. Ceci peut signifier un début de compaction des horizons. Le compost de fumier de vache et d'engrais organique a probablement eu un effet peu important sur l'activité biologique. Le pH révèle une activité faible possiblement liée à l'absence de couverture entre les rangs. La quantité de nitrates est plutôt faible et augmente avec la profondeur. La culture était en pleine production et les besoins de la plante ont augmenté. De plus, il est possible que la minéralisation soit bien avancée voir terminée au moment de l'observation, ce qui explique ces faibles taux de nitrates. L'augmentation avec la profondeur est difficile à expliquer autrement par un lessivage des nitrates. La conductivité diminue avec la profondeur, toutefois assez faiblement ce qui viendrait confirmer une activité biologique présente mais au ralenti.

4.5.2. Test de stabilité structurale

Tableau 34 : Résultat du test de stabilité structurale (Slake Test) dans 3 chapelles sur l'exploitation n°4

Chapelle	Date prélèvement	N° échantillon								Moyenne
		1	2	3	4	5	6	7	8	
1	26 Mai	6	6	6	6	2	6	6	6	5,5
2	26 Mai	2	6	6	3	6	2	3	6	4,3
5	30 Juin	6	6	6	6	6	6	6	6	6

Pour les chapelles 1 et 2, les mottes contenaient beaucoup de matière organique noire, probablement les intrants utilisés. Elles contenaient également un peu de racines et des petits cailloux. Lors du test elles se dégradèrent vite en surface, mais gardèrent leur intégrité, l'eau devenait donc vite trouble. Le centre des mottes ayant résisté au test était sec et compact.

La moyenne obtenue dans la chapelle témoin (chapelle 2) traduit un sol moyennement stable. La stabilité est probablement due à une stimulation de l'activité biologique par l'apport d'amendements et d'engrais organiques. La moyenne obtenue dans la chapelle test (chapelle 1) traduit un sol très stable. L'essai montre donc une meilleure stabilité structurale, cela est sûrement dû à la stimulation de l'activité biologique dans le sol par les intrants complémentaires utilisés : extraits fermentés et petits laits.

La moyenne obtenue dans la chapelle 5 traduit un sol très stable. La stabilité est probablement due à l'activité biologique dans ce sol montrée par les paramètres précédents, et une durée de travail supérieure d'un mois par rapport aux deux modalités précédentes. Les microorganismes ont probablement été stimulés par le compost fumier de vache et les engrais organiques.

4.6. Résultats de l'exploitation n°5

4.6.1. Évolution du pH, du redox, de la teneur en nitrates et de la conductivité

Tableau 35 : Évolution du pH, du redox, de la teneur en nitrates et de la conductivité du 26 mai au 16 juin sur l'exploitation n°5

Horizon	Prélèvement : 26 Mai					Prélèvement : 16 Juin				
	pH	mV	ppm	Unité d'azote	mS/cm	pH	mV	ppm	Unité d'azote	mS/cm
0-10	7,72	183	67	57	0,23	7,17	227	40,5	35	0,24
10-20	7,77	177	61	52	0,21	7,18	222	55	47	0,27
20-30	7,84	177	39,5	34	0,18	7,16	223	39	33	0,17

mV : potentiel d'oxydoréduction (mV) ; ppm : taux de nitrates (ppm) ; mS/cm : conductivité (mS/cm)

Le 26 mai, le pH augmente avec la profondeur ce qui traduit un sol sain avec une activité microbienne qui diminue en profondeur. Cependant les valeurs de pH sont toutefois très élevées, ce qui sous-entend une limitation de l'activité des familles de micro-organismes. Le 16 juin, le pH a diminué et est très stable sur les 3 horizons. L'acidification peut être due à l'apport de vinasse au goutte à goutte, à l'activité microbienne ou au développement de la culture. Cette stabilisation du pH peut être un début d'inversement. L'activité microbienne est probablement freinée. Un tassement du sol et un manque de couverture vivante peut être en cause.

Le potentiel d'oxydoréduction diminue de l'horizon 0-10 à 10-20 puis se stabilise en 20-30, il est inversé. Une fermentation méthane est probablement présente en profondeur. Un tassement du sol lié au travail du sol et/ou au passage d'engins sur sol humide peut être la cause. Cette tendance est conservée au 16 juin, cependant le potentiel d'oxydoréduction a augmenté ce qui peut se traduire par une oxydation induite par le développement de la culture. Le 26 mai, les quantités de nitrates diminuent normalement avec la profondeur. Ces données couplées avec

celles du pH montrent qu'il y a une bonne activité biologique répartie normalement sur les 3 horizons. Ceci est probablement dû à l'apport de vinasse de betterave le 11 mai et le 26 mai qui a stimulé l'activité des microorganismes ainsi que la minéralisation au moment du premier prélèvement.

Le 16 juin, les concentrations en nitrates ont baissé et augmentent entre l'horizon 0-10 et 10-20 pour diminuer en 20-30. La répartition des microorganismes n'est plus correcte. L'arrêt des apports de vinasse a sûrement un impact sur le développement des microorganismes qui minéralisent l'azote. Ils prennent une disposition inégale liée au tassement du sol et donc au manque d'oxygène. L'enfouissement du compost de fumier de cheval peut également provoquer cette répartition, cependant cette tendance n'était pas présente le 26 mai. Les besoins de la culture sont supérieurs le 16 juin, ce qui explique cette baisse de disponibilité en nitrates. Il est possible que la vitesse de minéralisation soit la même le 26 mai et le 16 juin et que l'absorption de nitrates par les racines soit supérieure le 16 juin et se fasse majoritairement dans l'horizon 0-10, ce qui expliquerait une plus grande quantité de nitrate dans l'horizon 10-20.

La conductivité diminue le 26 mai avec la profondeur ce qui traduit une activité microbienne bien répartie. Ceci confirmerait l'effet de la vinasse de betterave sur les microorganismes au moment de son apport. Le 16 juin la conductivité est inversée de l'horizon 0-10 à 10-20 où elle augmente puis diminue en 20-30. Ceci confirme une activité microbienne supérieure à l'horizon 10-20 en corrélation avec les concentrations nitriques. L'effet de la vinasse de betterave est clairement terminé et la répartition des microorganismes est inversée à cause du tassement et/ou de l'enfouissement du compost de fumier de cheval.

- Propositions d'amélioration.

Afin d'améliorer le potentiel d'oxydoréduction rapproché, il conviendrait de poursuivre les apports d'amendements organiques et de les laisser en surface, d'apporter des extraits fermentés et de réaliser une couverture vivante du sol (Petiot, 2014). Afin de limiter l'apparition d'une inversion du pH, il faudrait utiliser de la poudre de roche, notamment du basalte. Elle doit être épandue en même temps que l'amendement. Mettre en place un engrais vert peut également avoir un effet bénéfique (Petiot, 2014).

4.6.2. Test de stabilité structurale

Tableau 36 : Résultats du test de stabilité structurale (Slake Test) sur l'exploitation n°5

	N° échantillon								Moyenne
	1	2	3	4	5	6	7	8	
Date de prélèvement	Classes								
1 ^{er} Juillet	6	6	6	6	6	6	6	6	6

Les mottes contenaient beaucoup de racines et des petits cailloux. Le test de stabilité structural n'a pu être répété dans le temps, mais il aurait probablement été le même. L'eau est restée claire et très peu de terre s'est accumulée au fond du bac tout au long du test, c'est la seule exploitation où cela est observé. Le centre des mottes est resté sec et compact pour toutes les mottes.

Cette exploitation a obtenu la note maximale ce qui traduit un sol très stable. Cette excellente stabilité est due aux apports de compost de fumier de cheval et de compost de déchets verts réalisés depuis près de 15 ans sur cette exploitation, ce qui a pour effet de nourrir en permanence la flore du sol et permettre sa diversité. De plus, l'apport de vinasse de betterave uniquement réalisée depuis cette année semble avoir stimulé les microorganismes.

Sur cette exploitation la flore du sol est donc en permanence maintenue et stimulée par à-coups par la vinasse de betterave. Cependant l'apport de la vinasse de betterave semble avoir un effet éphémère et demande à être renouvelé régulièrement ou apporté en permanence au goutte à goutte. Elle semble aussi affaiblir à terme le potentiel du sol. Le tassement du sol a un impact important sur les populations de microorganismes.

4.7. Résultats de l'exploitation n°6

4.7.1. Évolution du pH, du redox, de la teneur en nitrates et de la conductivité

Tableau 37 : Évolution du pH, du redox, de la teneur en nitrates et de la conductivité du 27 Mai au 17 Juin sur l'exploitation n°6

Horizon	Prélèvement : 27 Mai					Prélèvement : 17 Juin				
	pH	mV	ppm	Unité d'azote	mS/cm	pH	mV	ppm	Unité d'azote	mS/cm
0-10	6,75	210	265	340	0,63	7,11	197	66	85	0,3
10-20	7,15	200	167	214	0,6	7,19	188	60	77	0,37
20-30	7,3	219	68	87	0,38	7,22	190	70,5	90	0,42

mV : potentiel d'oxydoréduction (mV) ; ppm : taux de nitrates (ppm) ; mS/cm : conductivité (mS/cm)

Le 27 mai le pH augmente avec la profondeur, il évolue dans le bon sens et est synonyme d'une activité microbienne diminuant avec la profondeur. Le 17 juin cette tendance est conservée et le pH a peu évolué sauf en surface où il a légèrement augmenté. Une augmentation du pH se traduit par une baisse de l'activité microbienne peut-être due à un manque de couverture du sol.

Le potentiel d'oxydoréduction, le 27 mai, diminue de l'horizon 0-10 à 10-20 puis augmente à l'horizon 20-30. Cette tendance est conservée le 17 juin. Ce gradient inversé traduit un tassement de l'horizon 10-20 et probablement une fermentation méthane. L'activité biologique est probablement inférieure à l'horizon 10-20. Le potentiel d'oxydoréduction a diminué avec le temps, ce qui suggère une augmentation globale de l'activité des microorganismes du sol qui ont consommé l'oxygène.

Le 27 mai, la teneur en nitrate du sol est très élevée et diminue avec la profondeur. De telles concentrations peuvent poser des problèmes de pucerons, et ceux-ci commencent à apparaître en juin pour fortement se développer en juillet sur la culture. Un compost de déchets verts a été apporté avant la culture et aucune fertirrigation n'a été réalisée. Le compost de déchets verts utilisé est censé avoir une minéralisation lente, de telles concentrations nitriques sont anormales. Elles proviennent probablement de la minéralisation avant la culture d'amendements de culture. En effet, pour la culture d'hiver (salade), la fumure est basée sur des apports massifs de compost de déchets verts. Le 17 juin, une grande majorité des nitrates ont été consommés par la culture et la teneur en nitrates augmente à l'horizon 20-30. Cette augmentation est due au fait que les plants sont encore jeunes et que les racines n'ont probablement pas encore atteint l'horizon 20-30. Il est probable également que la minéralisation y soit meilleure qu'à l'horizon 10-20 ce qui confirmerait l'hypothèse que l'activité biologique est inférieure à l'horizon 10-20. Un phénomène de lessivage est probable, liée aux irrigations de la culture. Si l'augmentation de la concentration nitrique de l'horizon 20-30 au cours de la culture n'est pas lié à un phénomène de lessivage, il est possible qu'un phénomène de minéralisation soit présent.

La conductivité, le 27 mai, diminue avec la profondeur et semble liée à la teneur en nitrate. Le 17 juin, la conductivité a diminué (probablement en corrélation avec les nitrates), mais s'est complètement inversée et augmente avec la profondeur. De telles valeurs montrent un dérèglement du sol et une inversion de l'activité biologique. Un enfouissement profond du compost de déchets verts pourrait expliquer ces résultats ou un tassement des premiers horizons.

- Propositions d'amélioration.

Afin d'améliorer le gradient du potentiel d'oxydoréduction, il conviendrait d'aérer le sol avec un griffage superficiel, de réaliser un décompactage léger, de mettre en place une couverture du sol vivante entre les cultures et d'apporter des extraits fermentés et des composts matures à base de pailles (Petiot, 2014). Pour le gradient de conductivité, il pourrait être intéressant d'amender avec du charbon de bois ; de stimuler les microorganismes aérobies en réalisant un décompactage léger ; de mettre en place des engrais verts ; apporter de l'azote organique animal pour améliorer la productivité de la parcelle (Petiot, 2014).

4.7.2. Test de stabilité structurale

Tableau 38 : Résultats du test de stabilité structurale (Slake Test) sur l'exploitation n°6

	N° échantillon								Moyenne
	1	2	3	4	5	6	7	8	
Date de prélèvement	Classes								
27 Mai	4	3	4	6	6	5	4	3	4,4
1 ^{er} Juillet	3	6	6	6	6	6	3	6	5,3

Les mottes contenaient beaucoup de racines et de matière organiques, probablement dû au compost de déchets verts. Elles étaient friables et cassantes. Un phénomène d'effervescence était présent lors du test. Elles se désagrégeaient à vue d'œil le 27 mai. L'eau est vite devenue trouble. Le centre des mottes ayant résisté au test était sec et compact.

La moyenne obtenue le 27 mai traduit un sol moyennement stable qui a évolué vers un sol très stable le 1^{er} juillet. La stabilité structurale est globalement bonne. Une amélioration de la stabilité structurale traduirait une augmentation des populations de microorganismes. Cependant, le sol de cette exploitation est très limoneux (62,8 %) ce qui suppose que les mottes sont issues du travail du sol. Les sols limoneux possèdent une bonne mémoire du travail du sol qui crée donc une structure plus durable (Roisin). Malgré une activité biologique moyenne dans cette exploitation, la stabilité structurale est bonne grâce à la présence importante de limons dans ce sol. L'amélioration de la note de slake-test est difficile à expliquer, peut être grâce à l'action des racines sur le sol ou au hasard de l'échantillonnage.

4.8. Exploitation n°7

4.8.1. Évolution du pH, du redox, de la teneur en nitrates et de la conductivité

Tableau 39 : Évolution du pH, du redox, de la teneur en nitrates et de la conductivité du 27 mai au 15 juin sur l'exploitation n°7

Horizon	Prélèvement : 27 Mai					Prélèvement : 15 Juin				
	pH	mV	ppm	Unité d'azote	mS/cm	pH	mV	ppm	Unité d'azote	mS/cm
0-10	7,12	216	216	300	0,75	7,02	230	117,5	167	0,71
10-20	7,17	221	186	265	0,75	7,03	232	134	191	0,69
20-30	7,26	220	181	257	0,65	7,12	230	103	147	0,64

mV : potentiel d'oxydoréduction (mV) ; ppm : taux de nitrates (ppm) ; mS/cm : conductivité (mS/cm)

Le 27 mai, le pH augmente normalement avec la profondeur et cette tendance est conservée au 15 juin, même si à cette date les deux horizons de surfaces ont les mêmes valeurs. Une légère acidification a lieu, elle peut être due à l'activité microbienne et/ou au développement de la culture. Elle peut également être due à l'apport d'engrais minéral au goutte-à-goutte.

Le 27 mai, le potentiel d'oxydoréduction augmente légèrement de l'horizon 0-10 à 10-20 puis se stabilise en 20-30. Le sol était saturé en eau, en profondeur il y avait probablement une absence d'oxygène, laissant place aux microorganismes anaérobies, au détriment des aérobies. Il y a probablement une fermentation méthane en profondeur. Le 15 juin la même tendance est observée avec une légère diminution à l'horizon 20-30. Une légère oxydation est présente, aux vues des conditions anoxiques en profondeur probablement liée au développement de la culture ou à l'apport d'engrais minéral.

Le 27 mai, les concentrations nitriques sont importantes et diminuent avec la profondeur. Ceci a donc probablement stimulé les microorganismes dans un court laps de temps. Puis les populations auraient rapidement diminué lorsque la minéralisation s'est terminée. Le 15 juin, il y a plus de nitrates dans l'horizon 10-20 puis la concentration diminue à l'horizon 20-30. Cela suggère que les racines sont moins présentes ou ont plus de mal à absorber dans l'horizon 10-20, probablement à cause d'un manque d'activité biologique et de la texture limoneuse du sol. Un phénomène de lessivage n'est pas à écarter.

Les valeurs de conductivité sont plus élevées dans cette exploitation par rapport à tous les sols analysés des autres exploitations de cette étude. Ceci est dû à l'apport important d'engrais minéral soluble augmentant significativement la conductivité. Le 27 mai, la conductivité est stable à l'horizon 0-10 et 10-20 et diminue à l'horizon 20-30. Ceci est probablement dû à l'apport d'engrais soluble en excès. La diminution à l'horizon 20-30 peut être due à une absorption partielle des éléments dans l'horizon supérieur qui lessive vers l'horizon 20-30. Cette tendance est conservée le 15 juin, la conductivité a légèrement diminué, probablement à cause de la consommation de nitrates libéré par la minéralisation du végétum.

4.8.2. Test de stabilité structurale

Tableau 40 : Résultats du test de stabilité structurale (Slake Test) sur l'exploitation n°7

	N° échantillon								Moyenne
	1	2	3	4	5	6	7	8	
Date de prélèvement	Classes								
27 Mai	6	6	6	6	6	6	6	3	5,6
2 Juillet	4	4	6	4	3	4	3	3	3,9

Les mottes contiennent un peu de racines et des parties noires, probablement des restes de végétum. Le 2 juillet, lors du test, les mottes se désagrègent très vite, beaucoup de terre s'accumule au fond du bac et l'eau devient vite trouble. Beaucoup d'écume se forme à la surface.

Le 27 mai, la moyenne obtenue traduit un sol très stable qui a évolué vers un sol moyennement stable. La forte stabilité obtenue le 27 mai est probablement due à l'effet-choc du végétum sur l'activité microbienne. Le végétum produit un sursaut microbien. Une fois la dégradation du végétum (rapidement) terminée, les populations microbiennes décroissent ainsi que leur diversité. De plus, l'apport en continu d'engrais minéral soluble au goutte-à-goutte ne fournit pas de substrat aux microorganismes pour persister dans le sol. En effet les molécules apportées sont déjà très simples et ne peuvent pas ou très peu être dégradées par les populations microbiennes. La perte de stabilité structurale au cours du temps est sûrement due à la perte de la flore du sol induite par les pratiques saturantes de fertilisation et d'apport d'eau.

4.9. Résultats de l'exploitation n°8

4.9.1. Évolution du pH, du redox, de la teneur en nitrates et de la conductivité

Tableau 41 : Évolution du pH, du redox, de la teneur en nitrates et de la conductivité du 28 Mai au 24 Juin sur l'exploitation n°8

Horizon	Prélèvement : 28 Mai					Prélèvement : 24 Juin				
	pH	mV	ppm	Unité d'azote	mS/cm	pH	mV	ppm	Unité d'azote	mS/cm
0-10	7,39	230	32	37	0,33	7,26	215	10,5	13	0,36
10-20	7,37	230	35	41	0,3	7,26	213	24	31	0,32
20-30	7,37	228	35	42	0,31	7,3	210	29	37	0,3

mV : potentiel d'oxydoréduction (mV) ; ppm : taux de nitrates (ppm) ; mS/cm : conductivité (mS/cm)

Le 28 mai, le pH diminue légèrement de l'horizon 0-10 à 10-20 puis n'évolue plus. Le 24 juin le pH a légèrement diminué, il est possible que les exsudats racinaires soient en causes, aux vues des autres paramètres, il est peu probable que ça soit l'œuvre des microorganismes. Le pH est quasiment stable sur les 3 horizons montrant une activité biologique faible. Sur cette exploitation aucune fumure de fond n'a été réalisée et il y a un apport d'engrais minéral au goutte-à-goutte, ces conditions ne favorisent pas l'installation et le développement de microorganismes. De plus, un travail du sol l'homogénéise et perturbe les microorganismes qui se seraient installés avant la culture en modifiant leur habitat (oxygène, substrat ...).

Le 28 mai, le potentiel d'oxydoréduction est stable de l'horizon 0-10 à 10-20 puis il diminue légèrement à l'horizon 20-30. Le 24 juin, cette tendance est conservée et le potentiel d'oxydoréduction a baissé. Cette légère baisse est sûrement liée à l'apport d'engrais soluble. Le fait que le potentiel d'oxydoréduction soit stable et baisse en profondeur est sûrement lié à une compaction du sol due au travail du sol associé à une fermentation méthane et un manque d'activité biologique induit par les pratiques culturales.

Les teneurs en nitrates, le 28 mai, sont plutôt basses et augmentent très légèrement avec la profondeur, elles sont inversées. Ceci est dû à la faible activité microbiologique et à l'absence de minéralisation. Les seuls apports sont ceux apportés par goutte-à-goutte. La culture était bien développée, le système racinaire devait être bien réparti sur ces 3 horizons, malgré la suspicion de compaction. Le 24 juin, la concentration nitrique a nettement baissé en surface et légèrement en profondeur et elle croît toujours avec la profondeur. Il est difficile d'expliquer cette nette diminution en surface par rapport à la profondeur. La culture étant en pleine production, les besoins ont augmenté. Le système racinaire semble moins performant à partir de l'horizon 10-20 qui semble s'enrichir par lixiviation. Les racines de l'horizon supérieur ont probablement augmenté leur activité.

Le 28 mai, la conductivité diminue très peu avec la profondeur, elle évolue dans le bon sens, mais trop peu. Cette tendance est conservée le 24 juin et la conductivité n'a pas évolué. Il est probable qu'il y ait une très faible activité microbiologique non liée à la minéralisation et qu'elle diminue avec la profondeur. Ces microorganismes semblent en faible concentration et

diversité aux vues des autres paramètres analysés. Le sol semble se comporter seulement comme un substrat quasiment inerte.

- Propositions d'amélioration.

Afin d'améliorer le pH en cours d'inversion, il conviendrait d'utiliser de la poudre de roche, notamment du basalte. Elle doit être épandue en même temps que l'engrais organique. Mettre en place un engrais vert peut également avoir un effet bénéfique sur un sol inversé (Petiot, 2014). Pour améliorer le potentiel d'oxydoréduction bloqué, il serait intéressant d'apporter des amendements organiques, des extraits fermentés et de réaliser une couverture vivante du sol (Petiot, 2014). Enfin pour améliorer la conductivité dont les valeurs sont trop rapprochées, il faudrait apporter de la montmorillonite (qui favorise les échanges dans le sol) ; apporter des fumures lorsque les températures sont inférieures à 12 °C (qui vont produire des formes d'azotes fournissant un substrat viable pour les microorganismes) ; éviter les compactages en ne travaillant pas sur des sols humides et en pratiquant des décompactages.

4.9.2. Test de stabilité structurale

Tableau 42 : Résultats du test de stabilité structurale (Slake Test) sur l'exploitation n°8

	N° échantillon								Moyenne
	1	2	3	4	5	6	7	8	
Date de prélèvement	Classes								
28 Mai	6	3	6	2	4	4	6	5	4,5

Les mottes contenaient des racines. Lors du test, un phénomène d'effervescence est apparu, la surface des mottes se désagrègeait très vite et l'eau est rapidement devenue trouble. Le centre des mottes ayant résisté au test est resté sec et compact. L'expérimentation n'a pu être répétée, car la culture a été arrachée avant le second prélèvement.

La moyenne obtenue traduit un sol moyennement stable. C'est un sol limoneux, les mottes sont probablement issues du travail du sol. De plus, en vue des pratiques culturales citées dans la partie précédente, ce sol devrait avoir une faible activité microbiologique. La stabilité structurale devrait être moindre. Cependant, les sols limoneux possèdent une bonne mémoire du travail du sol, le travail du sol crée donc une structure plus durable (Roisin). Si l'expérimentation avait été répétée il est probable que la stabilité ait diminué au cours de la culture, en effet l'agriculteur apporte des engrais minéraux solubles au goutte-à-goutte ce qui diminue l'activité microbiologique. La stabilité structurale pourrait sûrement être améliorée en apportant des amendements organiques et des éléments stimulant l'activité microbiologique au goutte-à-goutte comme des extraits fermentés.

4.10. Résultats de l'exploitation n°9

4.10.1. Évolution du pH, du redox, de la teneur en nitrates et de la conductivité

Tableau 43 : Évolution du pH, du redox, de la teneur en nitrates et de la conductivité du 26 mai au 19 juin sur l'exploitation n°9

Horizon	Prélèvement : 26 Mai					Prélèvement : 19 Juin				
	pH	mV	ppm	Unité d'azote	mS/cm	pH	mV	ppm	Unité d'azote	mS/cm
0-10	7,43	189	340,5	395	0,78	7,12	185	164,5	211	0,43
10-20	7,52	186	280,5	325	0,62	7,12	182	131	168	0,37
20-30	7,57	181	284,5	330	0,71	7,26	178	126	162	0,42

mV : potentiel d'oxydoréduction (mV) ; ppm : taux de nitrates (ppm) ; mS/cm : conductivité (mS/cm)

Le 26 mai, le pH augmente convenablement avec la profondeur, cela peut traduire un sol sain avec une concentration microbienne décroissante en profondeur. Le 19 juin cette tendance n'est pas conservée. Le pH est stable de l'horizon 0-10 à 10-20 puis augmente en profondeur, il y a blocage des deux premiers horizons. Le pH a diminué au cours de la culture, ceci est synonyme d'une activité microbiologique ou du développement de la culture. Le fait que le pH soit bloqué en surface signifie que les concentrations microbiennes sont les mêmes dans ces horizons et/ou que l'activité racinaire y est égale. Ceci peut être dû au travail du sol qui a homogénéisé ces horizons. Un tassement peut également être la cause.

Le 26 mai, le potentiel d'oxydoréduction diminue très légèrement avec la profondeur et cette tendance est conservée le 19 juin, il n'a pas non plus évolué. Ceci traduit une faible activité microbiologique. L'acidification serait donc liée aux exsudats racinaires. Le potentiel d'oxydoréduction, plutôt faible, traduit un manque d'oxygène dans ce sol ce qui confirme l'hypothèse de la compaction. Les températures étaient particulièrement élevées dans les serres de cette exploitation, cela a probablement eu un effet sur les microorganismes du sol.

Les concentrations nitriques sont très élevées sur cette exploitation, cela s'est traduit par des problèmes de pucerons importants sur poivron. L'agriculteur a apporté du tourteau de ricin qui minéralise vite ainsi qu'un engrais organique facilement assimilable. Il est donc normal de trouver ces grandes quantités de nitrates dans le sol. Il aurait peut-être été préférable d'opter pour une fumure minéralisant plus lentement. Le 26 mai, les nitrates diminuent avec la profondeur, mais reste relativement stable de l'horizon 10-20 à 20-30. Ces horizons ont probablement une plus faible activité de minéralisation liée à la compaction du sol alors qu'une activité est supérieure en surface. Le 19 juin les concentrations nitriques ont diminué, mais sont toujours élevées. Les matières facilement assimilables ont probablement été absorbées. De plus, le tourteau de ricin a été minéralisé en partie ou totalement, ce qui expliquerait la perte d'activité des microorganismes mise en évidence par les paramètres cités précédemment. Les teneurs en nitrates diminuent fortement entre l'horizon 0-10 et 10-20 puis sont plutôt stables à l'horizon 20-30. Ceci est lié à une compaction du sol dans les horizons 10-20 et 20-30.

La conductivité est très élevée, ceci est dû à la libération importantes de nutriments dont les nitrates. Le 26 mai elle diminue à l'horizon 10-20 puis augmente à l'horizon 20-30. Le 19 juin, la même tendance est observée, mais la conductivité a diminué. La diminution est due à

l'absorption des éléments solubles par la culture. L'augmentation de conductivité en profondeur est liée à la compaction du sol.

- Propositions d'amélioration.

Afin d'éviter l'inversion du pH, il pourrait être judicieux d'utiliser de la poudre de roche, notamment du basalte. Elle doit être épandue en même temps que l'engrais organique. Mettre en place un engrais vert peut également avoir un effet bénéfique (Petiot, 2014). Pour pallier l'inversion de conductivité, il peut être intéressant d'amender avec du charbon de bois ; de stimuler les microorganismes aérobies en réalisant un décompactage léger ; de mettre en place des engrais verts ; apporter de l'azote organique animal pour améliorer la productivité de la parcelle ; de protéger le sol avec une couverture, le bois raméal fragmenté étant idéal (Petiot, 2014).

4.10.2. Test de stabilité structurale

Tableau 44 : Résultats du test de stabilité structurale (Slake Test) sur l'exploitation n°9

	N° échantillon								Moyenne
	1	2	3	4	5	6	7	8	
Date de prélèvement	Classes								
26 Mai	2	1	3	4	3	1	1	3	2,3
1 ^{er} Juillet	6	5	6	6	3	6	4	6	5,3

Les mottes contenaient peu de racines et des petits cailloux. Lors du test, un phénomène d'effervescence est apparu à la surface et une écume s'est formée. Le 26 mai les mottes contenaient un peu de matière organique et se sont vite désagrégées lors du test. L'eau est rapidement devenue trouble. Le 1^{er} juillet, les mottes ayant résisté au test étaient bien humides, mais étaient tout de même encore sèches et compactes en leur centre.

Le 26 mai, la moyenne obtenue traduit un sol instable qui a évolué vers un sol très stable le 1^{er} juillet. Ces résultats sont très surprenants car le tourteau de ricin minéralisant vite les populations de microorganismes aurait dû diminuer en cours de culture et donc la note de slake test aurait dû se dégrader. De plus, les résultats précédents ont montré que la population de microorganismes n'évolue pas et même diminue au cours de la culture. De tels résultats sont difficiles à expliquer, peut-être des microorganismes anaérobies ont joué un rôle sur la structuration du sol. Ceci est possible au vu des faibles potentiels d'oxydoréduction traduisant un manque d'oxygène et la compaction du sol. Les racines ont pu structurer le sol. Il ne faut pas écarter une erreur de matériel et/ou de mesure.

4.11. Résultats de l'exploitation n°10

4.11.1. Évolution du pH, du redox, de la teneur en nitrates et de la conductivité

Tableau 45 : Point zéro avant plantation

Horizon	Prélèvement : 8 Janvier 2020		
	pH	mV	mS/cm
0-10	8,25	194	0,31
10-20	8,24	191	0,42
20-30	8,2	184	0,48

mV : potentiel d'oxydoréduction (mV) ; mS/cm : conductivité (mS/cm)

Tableau 46 : Évolution du pH, du redox, de la teneur en nitrates et de la conductivité du 16 mai au 15 juin dans les chapelles 1, 2 et 3 sur l'exploitation n°10

Chapelle	Horizon	Prélèvement : 16 Avril					Prélèvement : 15 Juin				
		pH	mV	ppm	Unité d'azote	mS/cm	pH	mV	ppm	Unité d'azote	mS/cm
1	0-10	6,66	160	364,5	407	0,54	6,7	231	194,5	267	0,58
	10-20	6,94	151	172	192	0,51	6,97	227	60	82	0,58
1	20-30	7,02	151	107	120	0,51	7	230	73	100	0,55
2	0-10	7,09	150	306,5	343	0,68	7,15	232	76	104	0,48
	10-20	7,25	147	152,5	170	0,51	7,11	233	53	73	0,46
2	20-30	7,24	150	230,5	258	0,67	7,17	235	48,5	67	0,41
3	0-10	7,07	160	276	308	0,53	7,07	239	74,5	102	0,52
	10-20	7,27	154	242	270	0,57	7,14	238	62,5	86	0,5
3	20-30	7,48	146	64	72	0,39	7,23	238	48,5	67	0,45

mV : Potentiel d'oxydoréduction (mV) ; ppm : taux de nitrates (ppm) ; mS/cm : conductivité (mS/cm)

Point zéro :

Avant la culture, le pH était relativement élevé et plutôt stable avec une légère décroissance en profondeur. Ceci signifie une faible activité des microorganismes. De plus, le sol est bloqué, probablement à cause de l'absence de couverture du sol et du fait que le sol soit à une température faible (saison hivernale). Le potentiel d'oxydoréduction est plutôt bas pour la saison et baisse légèrement avec la profondeur, il est inversé. Ceci est sûrement lié au manque d'activité microbienne, cela peut se traduire par un manque d'éléments nutritifs. La conductivité augmente avec la profondeur, elle est donc inversée. Un manque de microorganisme en est sûrement la cause. Le travail du sol ainsi que l'apport récurrent de bois « mort » peuvent significativement baisser la concentration en microorganismes de ce sol.

- Modalité Témoin (Chapelle 3) :

Le 16 avril le pH avait fortement diminué et présentait des valeurs augmentant avec la profondeur. L'acidification est probablement liée à une activité microbienne couplée au développement de la culture. En effet l'engrais organique apporté a pu stimuler l'activité des microorganismes. Le 15 juin, le pH est resté stable et conserve la même tendance avec une légère acidification dans les horizons 10-20 et 20-30. Cette légère acidification est

probablement due à l'apport de vinasse de betterave qui a stimulé les microorganismes de ces deux horizons.

Le 16 avril, le potentiel d'oxydoréduction a baissé, cette baisse peut être induite par une activité des microorganismes qui ont consommé l'oxygène, l'oxygène étant un accepteur d'électron, si sa concentration diminue, il y a plus d'électrons dans le milieu et le potentiel d'oxydoréduction diminue. Cependant un grand écart de temps est présent entre ces 2 mesures, il peut également avoir l'effet de la saison. Le potentiel d'oxydoréduction diminue avec la profondeur, le gradient est inversé. Cela traduit une fermentation méthane. Il y a probablement une mauvaise répartition des microorganismes dans le sol. Ceci est sûrement dû au travail et/ou au compactage du sol. L'apport de bois mort peut également diminuer et/ou impacter la concentration en microorganismes. En effet, il est difficilement dégradé. Le 15 juin, le potentiel d'oxydoréduction a significativement augmenté. Cette nette augmentation est probablement due à des facteurs extérieurs tels que le climat ou l'approche du solstice d'été, mais d'autres facteurs peuvent être mis en cause. Il est également possible que la culture ait fortement oxydé le sol. Mais la présence de microorganismes, stimulés par l'apport de vinasse de betterave, aurait dû diminuer cette oxydation en réduisant le milieu.

Au 16 Avril, les concentrations nitriques sont élevées et diminuent légèrement à l'horizon 10-20 puis très brutalement à l'horizon 20-30. Cela traduirait une activité des microorganismes correcte en 0-10 et 10-20 diminuant avec la surface puis une forte diminution des populations de microorganismes assurant la minéralisation à l'horizon 20-30. Ceci peut être confirmé par un pH nettement plus élevé dans l'horizon 20-30. Un compactage peut en être la cause. Le 15 juin les concentrations nitriques ont fortement diminué, l'engrais organique apporté a probablement été en partie minéralisé et sa minéralisation est ralentie, car il ne reste que des molécules plus complexes donc plus longues à minéraliser. Les besoins de la culture ont probablement augmenté. Les concentrations nitriques diminuent convenablement avec la profondeur ce qui signifie une bonne répartition des microorganismes dans le sol. La vinasse de betterave a probablement stimulé leur développement.

Le 16 avril, la conductivité augmente de l'horizon 0-10 à 10-20 puis diminue à l'horizon 20-30. Dans les premiers horizons, elle a augmenté par rapport au point zéro, mais a diminué en profondeur. Ce sol est donc inversé en surface puis montre un manque de microorganismes dans l'horizon 20-30. L'augmentation entre l'horizon 0-10 et 10-20 est difficile à expliquer aux vues des autres paramètres, cela peut être dû à un enfouissement de l'engrais organique ou de matière organique à cet horizon. Un effet du bois mort, peu dégradé par les microorganismes, peut également être un facteur. Les communautés de microorganismes sont peut-être en train d'évoluer et ce serait un état transitoire du sol. Le 15 juin la conductivité diminue avec la profondeur, évoluant alors conformément à l'activité microbiologique. Ceci peut être dû à l'effet stimulant de la vinasse de betterave sur les microorganismes.

- Modalité sans bois (Chapelle 2) :

Le 16 avril, le pH est sensiblement le même que la modalité témoin à l'exception de l'horizon 20-30 où le pH n'évolue pas par rapport à l'horizon 10-20. Le pH y est plus faible que dans le témoin ce qui signifie que l'activité des microorganismes est probablement stimulée dans cet horizon par rapport au témoin. Ceci est probablement un effet du petit lait de chèvre couplé aux extraits fermentés d'ortie. Le 15 juin, le pH est similaire sur les 3 horizons, avec une légère diminution dans l'horizon 10-20. Cela suggère que l'activité des microorganismes est faible en surface.

Le potentiel d'oxydoréduction, le 16 avril, est plutôt stable sur les 3 horizons contrairement au témoin qui diminue. Le 15 juin, il suit la même tendance que le témoin et reste invariable. Que ce soit le 16 avril ou le 15 juin le potentiel d'oxydoréduction est inférieur au témoin. Cela signifie que l'activité microbiologique est supérieure au témoin et que les extraits fermentés d'ortie et le petit lait ont stimulé leur présence. Les extraits fermentés et les produits lacto fermentés sont également de puissants réducteurs, ils ont probablement également réduit le milieu. La couverture vivante implantée peut également permettre de réduire et d'acidifier le milieu, mais celle-ci a eu un développement très faible par manque d'irrigation. Aussi, son effet serait camouflé par la culture bien plus développée.

Le 16 avril la teneur en azote est supérieure au témoin dans l'horizon 0-10 puis elle diminue de moitié à l'horizon 10-20 où elle est inférieure au témoin puis augmente à l'horizon 20-30 où elle dépasse le témoin. L'activité microbienne étant supérieure, la minéralisation de l'engrais organique a été plus rapide ce qui explique ces teneurs en azote supérieures dans l'horizon 0-10 et 20-30. Pour l'horizon 10-20, où la teneur est la plus basse, il est difficile d'expliquer ce phénomène. Il n'est présent dans aucune des autres modalités. Un tassement de l'horizon 10-20 est peut-être la cause. Il est possible qu'il y ait un lessivage et une accumulation dans l'horizon 20-30 ce qui expliquerait ces concentrations anormalement hautes dans l'horizon 20-30. Elles sont supérieures à toutes les modalités. Il y a peut-être dans cette modalité, le 16 avril, une activité microbiologique anormalement élevée dans cet horizon. Il aurait été stimulé par le petit lait et les extraits fermentés. Le 15 juin les teneurs en azote sont sensiblement les mêmes que le témoin.

La conductivité, le 16 avril, diminue de l'horizon 0-10 à 10-20 puis augmente à l'horizon 20-30. L'augmentation dans l'horizon 20-30 est corrélée aux teneurs en azote précédemment discutées. La conductivité est supérieure à celle des témoins et à la chapelle 1 ce qui suggère que l'activité biologique y est supérieure. Le 15 juin la conductivité suit la même tendance que le témoin et est relativement la même.

- Modalité fumier (Chapelle 1) :

Le 16 avril, le pH suit la même tendance que le témoin, mais est nettement moins élevé. Le pH est également moins élevé que la chapelle 2. Ceci indique une activité microbienne supérieure dans cette modalité. Elle a probablement été stimulée par l'apport de crottin de cheval et de Richumus. Le crottin de cheval a également probablement apporté de nouveaux

microorganismes. Le 15 juin, le pH suit toujours la même tendance que le témoin et est toujours plus acide.

Le potentiel d'oxydoréduction, le 16 avril, suit la même tendance que le témoin à l'exception qu'il reste stable de l'horizon 10-20 à 20-30. Il a le même ordre de grandeur que le témoin. Cette stabilité est probablement induite par une activité des microorganismes limitée comme discuté pour la modalité 2. Le 15 juin, le potentiel d'oxydoréduction suit la même tendance que le témoin et est du même ordre de grandeur.

Les teneurs en nitrates sont les plus élevées dans cette exploitation. Cela s'explique par les apports supplémentaires de crottin de cheval et de Richumus. Ils diminuent convenablement en profondeur traduisant une bonne répartition des microorganismes. Ceci peut s'expliquer par l'apport de crottin et de Richumus, car cette tendance n'est pas présente dans la chapelle 2. Le 15 juin, les teneurs en nitrates sont toujours supérieures à celles des autres modalités. Elles diminuent de l'horizon 0-10 à 10-20 puis ré augmente à l'horizon 20-30. Cette tendance est difficile à expliquer, peut-être que l'azote en excès, non absorbé, a lessivé vers l'horizon 20-30.

Le 16 avril, la conductivité diminue de l'horizon 0-10 à 10-20 puis reste stable à l'horizon 20-30. L'ordre de grandeur reste le même que le témoin. Il est surprenant que la conductivité soit inférieure à celle de la chapelle 2 sachant qu'il y a plus de nitrates dans la chapelle 1. Il est possible que le DCM Eco XTRA (apporté en plus grande quantité dans la chapelle 2) apporte plus d'éléments solubles ou de composés plus rapidement dégradables en molécules solubles par les microorganismes du sol que le crottin de cheval et le Richumus. Le crottin de cheval et le Richumus pourraient libérer plus lentement d'autres composés que les nitrates.

Les mêmes conductivités en profondeur peuvent être dû à un tassement du sol en profondeur. Le 15 juin, la conductivité a légèrement augmenté, probablement à cause de la dégradation du crottin de cheval et du Richumus en composés solubles. Elle n'évolue pas de l'horizon 0-10 à 10-20 et diminue à l'horizon 20-30. C'est la seule modalité où elle n'évolue pas en surface, ceci est probablement dû à une erreur de mesure. En effet ce phénomène est difficile à expliquer. Il se peut qu'il y ait une activité microbiologique égale dans ces 2 horizons sous l'effet de l'apport de vinasse de betterave et d'extraits fermentés d'orties.

- Discussion

L'utilisation de bois mort semble avoir probablement un effet sur les microorganismes. En effet il semble, au vu des résultats, que l'activité microbiologique soit moindre dans cette modalité témoin le 16 avril. Cependant les autres modalités ont reçu dès le 2 avril du petit lait de chèvre et des extraits fermentés d'orties. Ceci a probablement augmenté l'activité microbiologique. Le petit-lait couplé à l'extrait fermenté pourrait compenser l'effet du bois sur la population de microorganismes. Pour voir l'effet du bois mort, ils seraient judicieux de recommencer avec des modalités ayant pour unique différence la présence ou l'absence de bois mort. Quant à l'effet du petit lait de chèvre et des extraits fermentés d'orties, il est non négligeable. L'apport de crottin de cheval et de Richumus semble avoir stimulé l'activité microbiologique (ainsi que la concentration nitrique) le 16 avril. Le 15 juin les populations de microorganismes semblent

être les mêmes que dans les autres modalités (car le pH de la chapelle 1 n'a pas baissé, il a même augmenté). Il semblerait que l'apport de vinasse de betterave au goutte-à-goutte (à partir du 25 mai) vienne camoufler l'effet du petit lait de chèvre, de l'extrait fermenté d'ortie, du crottin de cheval et du Richumus. La vinasse de betterave semble suffisante pour stimuler les populations de microorganismes et semble avoir un effet supérieur. Néanmoins, la vinasse n'apporte pas de support au développement des micro-organismes, mais seulement l'effet boost qui peut être limité dans le temps. Les valeurs de potentiel d'oxydoréduction et de conductivité n'ayant pas une évolution normale montrent un sol déstructuré. Il lui faudra plusieurs années pour rétablir les gradients de potentiels si des pratiques les favorisant sont mises en place. L'effet de la phacélie n'est pas visible, probablement par manque de développement végétatif.

4.11.2. Test de stabilité structurale

Tableau 47 : Résultats du test de stabilité structurale (Slake Test) dans les chapelles 1, 2 et 3 sur l'exploitation n°10

Chapelle	Date de prélèvement	N° échantillon								Moyenne
		1	2	3	4	5	6	7	8	
1	16 Mai	6	6	3	6	3	3	4	6	4,6
1	2 Juillet	4	6	6	6	6	6	6	4	5,5
2	16 Mai	6	6	6	6	6	6	6	6	6
2	2 Juillet	6	6	6	6	6	6	6	6	6
3	16 Mai	6	6	6	4	6	6	6	6	5,8
3	2 Juillet	6	6	6	1	6	6	6	6	5,4

Les mottes de la première chapelle comprenaient des parties noires, peut-être des restes d'engrais organiques. Les mottes étaient cassantes. Lors du test, dans toutes les modalités, la surface des mottes se désagrègeait vite, mais pas complètement. L'eau devenait donc rapidement trouble. Un léger phénomène d'effervescence est présent dans toutes les modalités. Le centre des mottes résiduelles était sec et compact.

Dans la chapelle 3, la modalité témoin, la moyenne obtenue le 16 avril traduit un sol très stable dont la stabilité diminue très légèrement le 2 juillet. Cette perte de stabilité est difficile à expliquer, et il est probable que cela provienne de la variabilité des mottes. La stabilité est bonne, car l'activité des microorganismes a été stimulée avant la culture par l'engrais organique, puis a pu être maintenue et améliorée par l'apport de vinasse de betterave, sur support de bois en fond.

Dans la chapelle 1, la modalité « fumier », la moyenne du 16 avril traduit un sol moyennement stable, proche du très stable qui évolue vers un sol très stable le 2 juillet. C'est dans cette modalité que la stabilité est la moins bonne. Ceci peut s'expliquer par le fait que la fumure ait été apportée tardivement lorsque les températures du sol dépassaient 12 °C. En effet, d'après Eric Petiot (2017), apporter une fumure à des températures supérieures à 12 °C favorise la formation d'azote soluble facilement assimilable par les plantes qui est uniquement favorable à la croissance des plantes, mais ne fournit pas un bon substrat aux microorganismes. Il est

possible que la diversité microbienne ainsi que la concentration aient négativement été impactées par l'apport de fumier ce qui traduirait cette perte de stabilité structurale. Même si elle est moins bonne que dans les autres modalités, elle reste intéressante et s'améliore le 2 juillet, probablement grâce à l'apport de vinasse de betterave qui a stimulé l'activité microbienne.

Dans la chapelle 2, la modalité « sans bois », les moyennes du 16 avril et du 2 juillet sont maximales, la stabilité structurale est la meilleure des 3 modalités. Ceci est probablement dû à l'apport simultané d'engrais organique et de petit lait de chèvre et d'extrait fermenté d'ortie qui a stimulé l'activité des microorganismes dès le début de culture. L'activité est restée bonne grâce au maintien de l'apport d'extraits fermentés d'ortie, puis l'apport de vinasse.

4.12. Influences des différents paramètres

4.12.1. Slake test, texture du sol et activité microbiologique

- Sols limoneux

Les sols limoneux possèdent une bonne mémoire du travail du sol qui crée une structure plus durable (Roisin). Cependant, il n'existe pas de différences significatives pour la stabilité structurale entre les sols limoneux (>40 % de limon) et les autres sols (test de Wilcoxon-Mann-Whitney, p-value = 0,2315 pour première répétition et p-value = 0,1644 pour la deuxième répétition ; >0,05). Cela suggère que la stabilité structurale induite par les sols limoneux est équivalente à une stabilité structurale induite par l'activité biologique. Cela signifie qu'un sol inactif biologiquement, mais limoneux avec un travail du sol peut avoir une bonne stabilité structurale. Cependant, ces résultats ont été obtenus sur un petit nombre d'exploitations, ils sont donc discutables. Il serait intéressant de répéter cette expérimentation sur un plus grand nombre d'exploitations.

- Sols sableux

D'après les résultats de L. Tosello (2018), les sols sableux semblent avoir une moins bonne stabilité structurale. En effet, le sol sableux a une structure très instable. C'est un élément grossier du sol, il n'a pas la capacité comme les argiles ou limons à se lier à d'autres éléments organiques ou minéraux (Tosello, 2018). Cependant, aucune différence significative au niveau de la stabilité structurale n'a été mise en évidence entre les exploitations avec un sol sableux et celles avec un sol limoneux (test de Wilcoxon-Mann-Whitney, p-value = 0,4525 pour première répétition et p-value = 0,8482 pour la deuxième répétition ; >0,05). Cela est inattendu, car les exploitations ayant un sol limoneux doivent produire des mottes stables avec le travail du sol ce qui n'est pas le cas avec les sols sableux. L'activité biologique ainsi que la présence de

complexe argilo humique dans les sols sableux analysés ont pu améliorer la stabilité structurale de ceux-ci ce qui expliquerait cette absence de différence. Cela suggère que, même avec une texture du sol défavorable à une bonne stabilité structurale, il est possible d'obtenir une bonne stabilité avec des pratiques culturales favorisant le développement des microorganismes. Cependant cela reste à confirmer en répétant cette expérimentation sur une plus grande quantité d'exploitations limoneuses et sableuses.

- Sols argilo-sableux limoneux

Les sols de La Crau ont été enrichis en limons par le passage de la Durance et probablement par l'eau des canaux provenant de la Durance. Ces sols caillouteux ont été enrichis en limons. De plus, les sols de la Crau contiennent une quantité importante d'argiles ce qui favorise la formation du complexe argilo humique. Il est probable que cela augmente la stabilité structurale de ces sols. Cependant, aucune différence significative n'a été trouvée entre les exploitations situées dans La Crau (exploitation n°3, 4 et 5) et les autres (test de Wilcoxon-Mann-Whitney, p-value = 0,2315 pour première répétition et p-value = 0,1644 pour la deuxième répétition ; >0,05). Cependant, si l'on exclut l'exploitation n°3, lors de la deuxième série d'analyse de stabilité structurale, il y a une différence significative entre les exploitations de La Crau (sans l'exploitation n°3) et les autres (test de Wilcoxon-Mann-Whitney, p-value = $7,17 \cdot 10^{-5}$ *** ; >0,05). Dans l'exploitation n°3 des engrais solubles sont apportés au goutte-à-goutte contrairement aux exploitations n°4 et 5 qui stimule l'activité biologique par divers intrants comme par exemple la vinasse de betterave. Cela suggère que les sols de La Crau montrent une stabilité structurale excellente, meilleure que les autres sols, dès lors que leur activité biologique est stimulée. Cependant, en absence d'activité biologique ces bénéfices sont perdus. Néanmoins, ces résultats demandent à être confirmés, en effet seules deux exploitations de La Crau ont permis de mettre en évidence cette différence significative, il conviendrait de répéter l'expérience sur un plus grand nombre de sols de La Crau avec et sans stimulation des microorganismes.

4.12.2. Stabilité structurales et paramètres électro-magnétiques

D'après la figure 1, il n'existe pas de corrélation entre la stabilité structurale et le pH, le potentiel d'oxydoréduction et la conductivité. Il est possible que ces paramètres influencent ou soient influencés par l'activité biologique du sol (responsable de la stabilité structurale), mais ils n'ont pas une grande responsabilité dans la stabilité structurale. De plus, même s'il est possible que ces paramètres soient influencés par l'activité biologique, ils sont également facteur de nombreux paramètres extérieurs. Enfin, comme montré précédemment, la stabilité structurale n'est pas uniquement influencée par l'activité biologique, la texture du sol est également impliquée.

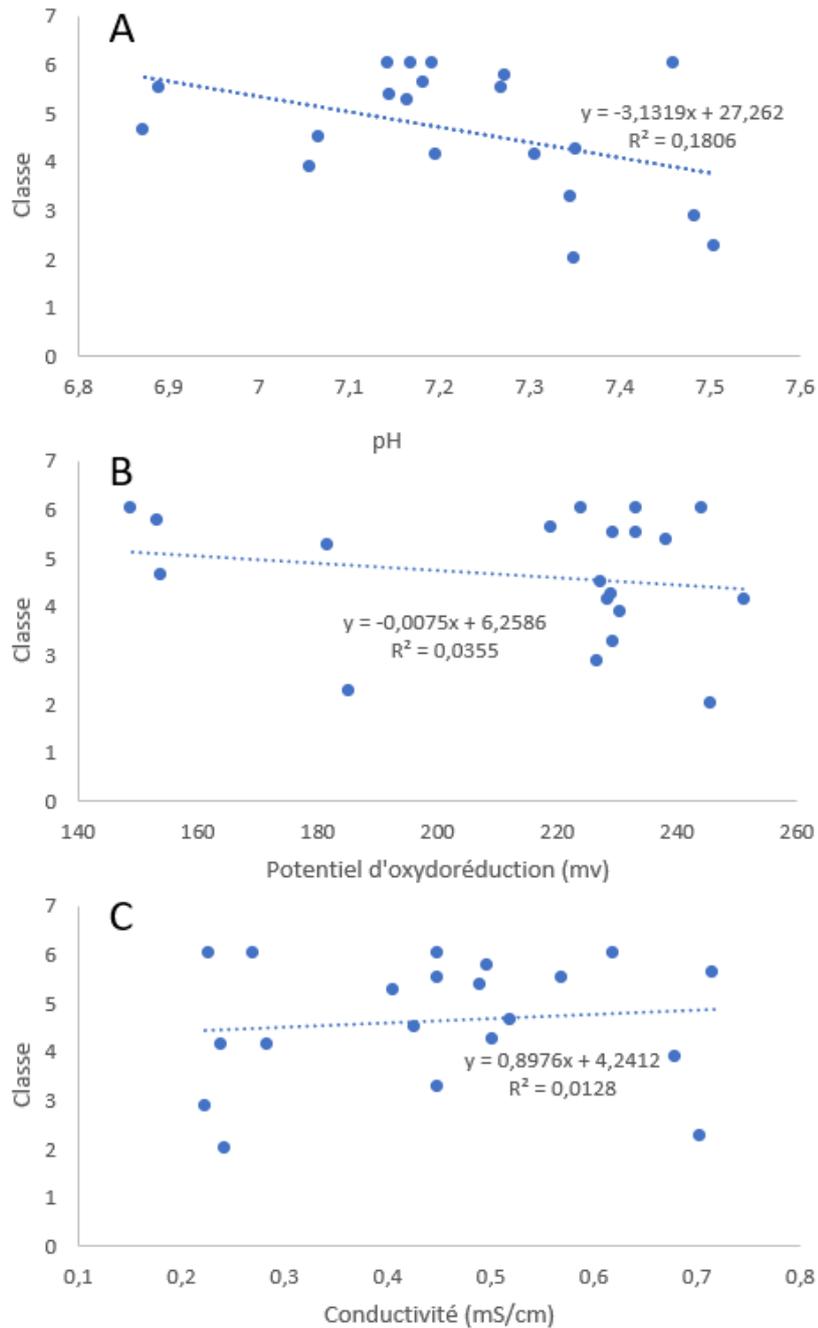


Figure 1 : Courbes de tendance entre la stabilité structurale et le pH (A), le potentiel d'oxydoréduction (B) et la conductivité (C)

4.12.3. Nitrates et conductivité électrique

Les nitrates (NO_3^-) sont des composés solubles chargés (ions), ils ont donc une influence sur la conductivité. D'après la figure 2, il semble que les nitrates expliqueraient qu'en partie la conductivité dans les sols agricoles ($R^2 = 0,47$). La corrélation est faible. En effet, c'est une des

molécules solubles apportées grande quantité dans les cultures. Cependant, d'autres molécules solubles (ions) sont présentes dans les sols agricoles et influencent la conductivité des sols. Elles peuvent être issues des intrants ou être naturellement présentes. La potasse apportée également en grande quantité pourrait présenter une corrélation avec la conductivité.

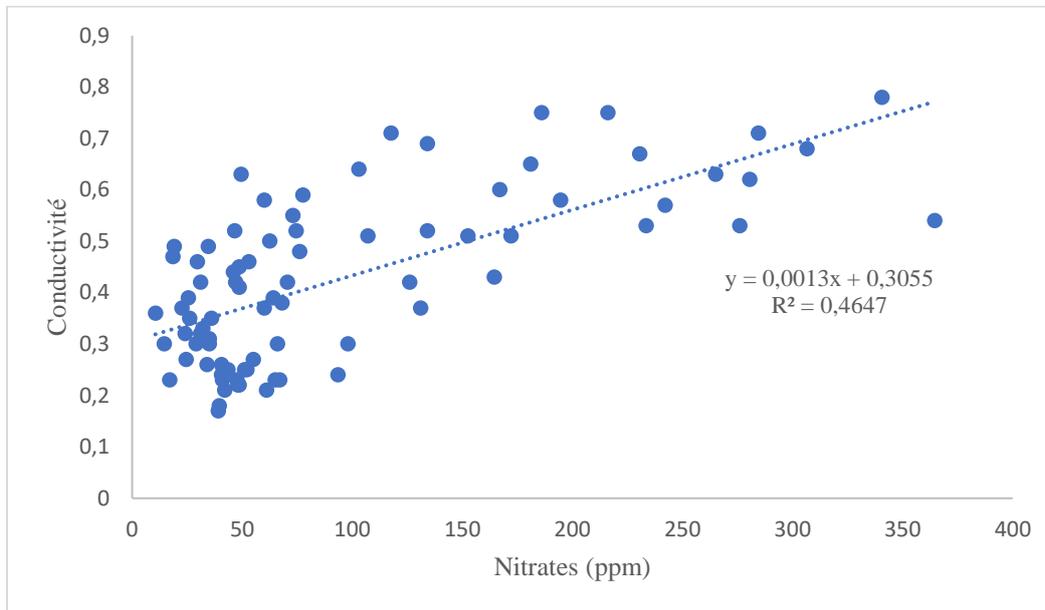


Figure 2 : Interaction entre la conductivité et le taux de nitrates (ppm)

5. Conclusion

Notre étude présente les paramètres du sol tels que le pH, le potentiel d'oxydoréduction et la conductivité ainsi que le protocole pour les analyser. Leur analyse permet de mettre en exergue l'influence des pratiques culturales sur l'activité biologique des sols étudiés ainsi que l'influence des différents intrants, leurs effets sur les microorganismes du sol. En effet, les fumures et les engrais organiques stimulent l'activité biologique, et a contrario les engrais minéraux solubles semblent défavorables au développement microbien. Il est possible de stimuler les populations microbiologiques en cours de culture. En effet, la vinasse de betterave semble être un outil intéressant, type booster, pour favoriser le développement microbien. Ce phénomène est aussi observé dans une mesure moins abrupte par l'utilisation d'extraits fermenté et de ferments lactiques (petit lait). L'apport d'engrais soluble, semble quant à lui ne pas stimuler l'activité biologique, mais au contraire la diminuer en ne fournissant pas de substrat aux microorganismes.

Les paramètres étudiés ont également permis de mieux comprendre les sols prélevés et de mettre en évidence les phénomènes de minéralisation, de compaction, d'aération du sol ou bien d'absorption racinaire. L'analyse de l'évolution de ces paramètres a permis de mettre en

évidence des processus se produisant en cours de culture comme l'acidification liée à l'activité biologique et/ou l'exsudation racinaire, la respiration des microorganismes réduisant le milieu, mais également l'évolution de l'activité biologique liée aux pratiques culturales en cours de culture grâce au test de stabilité structurale. Cela a permis de mettre en évidence l'hétérogénéité induite par les pratiques culturales, néanmoins, il a été montré que le type de sol influe sur ces paramètres, notamment sur la stabilité structurale.

Les informations obtenues grâce à ces différents paramètres pourraient être complétées afin de mieux comprendre les phénomènes présents dans les sols. En effet l'activité biologique est fortement influencée par la présence d'eau et la température ; il pourrait être intéressant de les mesurer pour les comparer aux paramètres étudiés. De plus, afin de mettre en évidence l'activité biologique, il pourrait être intéressant de déterminer la concentration en bactérie dans chacun des sols étudiés, mais également d'isoler sur milieu sélectif des bactéries connues comme ayant un rôle dans le cycle de l'azote, notamment dans la minéralisation. Il pourrait être pertinent de vérifier la corrélation entre la concentration bactérienne (et/ou diversité) et la stabilité structurale (en prenant soin d'étudier spécifiquement les sols limoneux et les sols de La Crau). L'azote ammoniacal étant également absorbé par les plantes, une analyse en laboratoire du taux d'ammonium dans les sols étudiés peut-être intéressante. En effet, la réduction de l'ammonium en nitrate a un coût énergétique pour les plantes. Par ailleurs, la forme d'azote absorbée a une influence sur le pH du sol (Marschner et al, 1986). Enfin, l'étude de paramètres tels que la vitalité (émission de photon) ou le paramagnétisme pourrait nous permettre de mieux comprendre les paramètres étudiés et donnerait une information complémentaire sur la santé des sols. Les expérimentations sur l'effet de divers intrants demanderaient à être répétées sans l'utilisation de vinasse de betterave (ayant un effet sur l'activité biologique) et avec des témoins pour chaque modalité.

Une connaissance approfondie du pH, du potentiel d'oxydoréduction et de la conductivité par les agriculteurs pourrait permettre de reconnaître un sol optimal pour chaque culture en interaction avec ses microorganismes et les pratiques culturales adaptées. Cela permettrait de favoriser la croissance et le développement des cultures. En effet, un sol « optimal » fournirait les nutriments sous une forme facilement disponible. Il fournirait également des conditions favorables aux microorganismes utiles et des conditions défavorables aux agents pathogènes. Les plantes pourraient se concentrer sur leur métabolisme plutôt que la modification de leur environnement proche. Cependant, le pH, le potentiel d'oxydoréduction et la conductivité du sol sont très probablement fonction de la température et varient en fonction de la disponibilité en eau, l'irrigation affectant non seulement la disponibilité en eau, mais également la disponibilité en oxygène dans le sol. Afin d'arriver à la caractérisation des conditions optimales, il faudrait un développement des connaissances des valeurs optimales et limitantes, ainsi que de l'influence des espèces végétales cultivées.

Références

- Acton CJ, Rennie DA, Paul EA (1962) The relationship of polysaccharides to soil aggregation, *Can. J. Soil Sci*, pp. 201–209
- Benada J (2009) A non invasive method for redox potential measurement, *Obilnarske Listy* 14:15-18
- Bessonova AP, Stas IE (2008) High frequency electromagnetic field effect on physical-chemical properties of water and its spectral characteristics, *Polzunovsky Vestn. Barnaul, Russ.* 3 305309
- Blokhina O, Virolainen E, Fagerstedt KV (2003) Antioxidants, oxidative damage and oxygen deprivation stress: a review. *Ann Bot* 91:179–194
- Bohrerova Z, Stralkova R, Podesvova J, Bohrer G, Pokorny E (2004) The relationship between redox potential and nitrification under different sequences of crop rotations. *Soil Till Res* 77:25–33
- Brady NC, Weil RR (2010) *Elements of the nature and properties of soils*. Pearson Education International, New Jersey
- Chadwick OA, Chorover J (2001) The chemistry of pedogenic thresholds. *Geoderma* 100:321–353
- Clay DE, Clapp CE, Linden DR, Molina JAE (1992) Tillage influence on redox potentials following rainfall. *Soil Till Res* 22:211–219
- Fenchel T, King GM, Blackburn TH (1998) *Bacterial biogeochemistry. The ecophysiology of mineral cycling*. Academic, San Diego
- Flessa H, Fischer W (1992) Redox processes in the rhizosphere of terrestrial and paludal plants. *J Plant Nutr Soil Sci* 155:373–378
- Gambrell RP, Patrick WH Jr (1978) Chemical and microbiological properties of anaerobic soils and sediments. In: Hook DD, Crawford RM (eds) *Plant life in anaerobic environments*. Ann Arbor Science, Ann Arbor, pp 375–423
- Grable AR, Siemer EG (1967) Effects of bulk density, aggregate size, and soil water suction on oxygen diffusion, redox potentials, and elongation of corn roots. *Soil Sci Soc Am J* 32:180–186
- Grundl T (1994) A review of current understanding of redox capacity in natural, disequilibrium systems, *Chemosphere* 28:613-626
- Hayley K, Bentley LR, Gharibi M, Nightingale M (2007) Low temperature dependence of electrical resistivity: Implications for near surface geophysical monitoring, *Geophysical research letters* 34, L18402

- Horn R, Peth S (2009) Soil structure formation and management effects on gas emission. *Biologia* 64:449–453
- Husson O (2013) Redox potential (Potentiel d'oxydoréduction) and pH as drivers of soil/plant/microorganism systems: a transdisciplinary overview pointing to integrative opportunities for agronomy, *Plant Soil* 362:389-417
- Husson O, Husson B, Brunet A, Babre D, Alary K, Sarthou JP, Charpentier H, Durand M, Benada J, Henry M (2016) Practical improvements in soil redox potential (Eh) measurement for characterisation of soil properties. Application for comparison of conventional and conservation agriculture cropping systems, *Analytica Chimica Acta* 906:98-109
- Kaurichev IS, Tararina LF (1972) On redox conditions inside and outside of aggregates in a grey forest soil. *Pochvovedenie* 10:39–42
- Kralova M, Masscheleyn PH, Patrick WH Jr (1992) Redox potential as an indicator of electron availability for microbial activity and nitrogen transformations in aerobic soil. *Z Mikrobiol* 147:388–399
- Laanbroek HJ (1990) Bacterial cycling of minerals that affect plant growth in waterlogged soils: a review. *Aquat Bot* 38:109–125
- Lambers H, Chapin SFI, Pons TL (2008) *Plant physiological ecology*. Springer, New York
- Lambers H, Mougél C, Jaillard B, Hinsinger P (2009) Plantmicrobe-soil interactions in the rhizosphere: an evolutionary perspective. *Plant Soil* 321:83–115
- Mansfeldt T (2003) In situ long-term redox potential measurements in a dyked marsh soil. *J Plant Nutr Soil Sci* 166:210–219
- Marschner H, Römheld V, Horst WJ, Martin P (1986) Root-induced changes in the rhizosphere: Importance for the mineral nutrition of plants. *Zeitschrift Für Pflanzenernährung Und Bodenkunde*, 149(4):441–456
- Marschner P (1995) *Mineral nutrition of higher plants*, 2nd edn. Academic, London
- Mohanty SK, Saiers JE, Ryan JN (2015) Colloid Mobilization in a Fractured Soil during Dry-Wet Cycles : Role of Drying Duration and Flow Path Permeability. *Environ Sci Technol* 15:9100-6
- Olness A, Rinke J, Hung H-M, Evans SD (1989) Effect of tillage on redox potential of a Tara Silt Loam soil. *Soil Sci* 148(4):265–274
- Paillet Y, Cassagne N, BrunJJ (2010) Monitoring forest soil properties with electrical resistivity. *Biology and Fertility of Soils*, Springer Verlag, 46(5):451-460

- Paustian K, Andr en O, Janzen HH, Lal R, Smith P, Tian G, Tiessen H, Van Noordwijk M, Woomer PL (1997) Agricultural soils as a sink to mitigate CO₂ emissions. *Soil Use Manage* 13:230–244
- Petiot E (2014) L'agriculture énergétique pour les soins du sol et des plantes. Terran, Escalquens. pp:129-139
- Petiot E (2017) Soigner les arbres et les petits fruits par les plantes <https://www.produire-bio.fr/articles-pratiques/soigner-arbres-petits-fruits-plant/> (Accessed June 22)
- Petiot E (2020) Les alternatives biologiques aux pesticides. Solutions naturelles au jardin et en agriculture. Terran, Escalquens pp:75
- Rabenhorst AC, Hively WD, James BR (2009) Measurements of soil redox potential, *Soil Sci. Soc. Am. J.* 73:668-674
- Rabotnova IL, Schwartz W (1962) The importance of physicalchemical factors (pH and rH₂) for the life activity of microorganisms. VEB Gustav Fischer Verlag, Berlin
- Richard G, Besson A, Sani AA, Cosenza P, Boizard H, Cousin I (2006) A new approach of soil structure characterisation in field conditions based on electrical resistivity measurements. In: Horn R, Fleige H, Peth S, Peng XH (eds) *Soil management for sustainability*. Catena Verlag, Reiskirchen, pp 415–421
- Roisin C Techniques culturales sans labours : en sols limoneux, attention au pass  culturel de la parcelle, *Agriculture de conservation*
- Rousseau J (1959) Etude du sol. *Rev Pharm Ouest* Janvier 1959:22
- Samou lian A, Cousin I, Tabbagh A, Bruand A, Richard G (2005) Electrical resistivity survey in soil science: a review .. *Soil and Tillage Research*, Elsevier, 83(2):173-193
- Savant NK, Ellis RJ (1964) Changes in redox potential and phosphorus availability in submerged soil. *Soil Sci* 98:388–394
- Seladji S, Cosenza P, Tabbagh A, Ranger J, Richard G (2010) The effect of compaction on soil electrical resistivity: a laboratory investigation, *European Journal of Soil Science* 61:043-1055
- Shatalov V, Noga I, Zinchenko A (2010) Degassing of bioliquids in low electromagnetic fields, *Electron J. Biol.* 6:67-72
- Snakin VV, Prisyazhnaya AA, Kovacs-Lang E (2001) *Soil liquid phase composition*. Elsevier Science B.V, Amsterdam
- Son Y, Oh M, Lee S(2010) Estimation of soil weathering degree using electrical resistivity. *Environ Earth Sci* 59:1319–1326
- Stolzy LH, Letey J (1964) Characterizing soil oxygen conditions with a platinum microelectrode. *Adv Agron* 16:249–279

Thomas CR, Miao SL, Sindhoj E (2009) Environmental factors affecting temporal and spatial patterns of soil redox potential in Florida Everglades wetlands, *Wetlands* 29:1133-1145

Tosello L (2018) *Fertilité du sol : rôle des amendements organiques*. Université d'Avignon

Whitfield M (1974) Thermodynamic limitations of the use of the platinum electrode in Eh measurements, *Limnol. Oceanogr.* 19:857-865

Résumé

Dans le cadre du réseau FERME DEPHY, animé par la Chambre d'agriculture des Bouches-du-Rhône auprès des maraîchers, les paramètres des sols du réseau : pH, potentiel d'oxydoréduction, taux de nitrates, conductivité et stabilité structurale ont été analysés. Au moins une répétition par exploitation a été réalisée afin d'observer l'évolution des paramètres dans le temps. Ces observations ont mis en évidence l'influence des pratiques culturales avant et pendant la culture ainsi que l'interaction entre ces paramètres, les pratiques culturales et l'activité biologique.

L'effet des pratiques culturales sur la santé du sol a été mise en évidence et permet de préconiser des pratiques améliorantes pour les agriculteurs. En effet si les plantes sont dans des conditions optimales, leurs productivités sont maximales et elles sont moins sensibles aux maladies et aux ravageurs.

L'analyse de ces paramètres a permis de diagnostiquer certains problèmes comme par exemple la compaction du sol.

Aucune interaction entre les paramètres étudiés n'a été mise en évidence à l'exception d'une faible corrélation entre la conductivité et le taux de nitrates ($R^2 = 0,46$).

Les sols de la plaine de la Crau pourraient posséder une meilleure stabilité structurale.

Une meilleure connaissance de ces paramètres permettrait de déterminer les valeurs optimales pour chaque espèce végétale cultivée et leurs microorganismes associés. Il serait alors possible de proposer les pratiques culturales les plus favorables pour atteindre ces paramètres « optimaux » et de sensibiliser les producteurs à une meilleure gestion de la santé de leurs sols en les amenant vers une intensification microbiologique.

Mot clefs : pH, potentiel d'oxydoréduction, taux de nitrates, conductivité, stabilité structurale.

Abstract

Within the FERME DEPHY network, led by the Bouches-du-Rhône Chamber of Agriculture with market gardeners, the soil parameters of the farms: pH, redox potential, nitrate level, conductivity and structural stability were analyzed. At least one repetition per operation was carried out in order to observe the evolution of the parameters over time. These observations highlighted the influence of cultivation practices before and during cultivation as well as the interaction between these parameters, cultivation practices and biological activity.

The effect of cultivation practices on soil health has been demonstrated and allowed to recommend good practices for farmers. Indeed, if the plants are in optimal conditions, their productivity is maximum, and they are less sensitive to diseases and pests.

The analysis of these parameters allows to diagnose specific problems, for example soil compaction.

No interaction between the parameters studied was demonstrated except a weak correlation between the conductivity and the nitrate level ($R^2 = 0.46$).

The soils of the Crau plain may have better structural stability.

A better knowledge of these parameters would allow to determine the optimal values for each cultivated plant species and their associated microorganisms. It would then be possible to propose the most favorable cultivation practices to achieve these "optimal" parameters and to sensitize producers to better management of the health of their soils by leading them towards microbiological intensification.

Keywords: pH, redox potential, nitrate level, conductivity, structural stability.