



MÉMOIRE DE FIN D'ÉTUDES
présenté pour l'obtention du
DIPLÔME D'INGÉNIEUR AGRONOME

option : Viticulture Œnologie

Recherche de bioindicateurs
du sol

par

Virgile GIUGE

Année de soutenance : 2016

Organisme d'accueil : Cabinet d'Agronomie Provençale



MÉMOIRE DE FIN D'ÉTUDES
présenté pour l'obtention du
DIPLÔME D'INGÉNIEUR AGRONOME

option : Viticulture Œnologie

Recherche de bioindicateurs
du sol

par

Virgile GIUGE

Mémoire préparé sous la direction de :

Edith LE CADRE
Jean Michel BOURSIQUOT
Didier OLLE

Organisme d'accueil : Cabinet
d'Agronomie Provençale

Présenté le : 03/11/2016

Maître de stage : Pierre GUERIN

Remerciements

Je tiens tout d'abord à remercier Laurence Berlemont pour m'avoir accepté au sein de sa structure, le Cabinet d'Agronomie Provençale, ainsi que toute son équipe qui m'a accueilli chaleureusement.

Je souhaite tout particulièrement remercier Pierre Guérin ainsi que Eric Navarro, mes deux principaux formateurs, encadrants, collaborateurs de l'étude qui sera présentée ici. Ils ont su me guider, consacrer de leur temps malgré leur volatilité imposée par le métier de conseiller. Ils se sont impliqués dans le projet que nous avons donc mené ensemble et pour cela je les remercie.

Je remercie toute l'équipe de l'ICV de Brignoles qui m'a gracieusement donné accès à son laboratoire pour les mesures fréquentes que j'avais besoin de réaliser. C'est une équipe très souriante qui m'a mise à l'aise malgré le fait que je sois entièrement étranger à la structure.

Je remercie Xavier Salducci du laboratoire Celesta-lab et Cécile Villenave du laboratoire Elisol pour leur collaboration. Et en particulier Cécile qui m'a accueilli à son laboratoire à Congénies afin de discuter de façon approfondie des résultats obtenus avec eux, visiter le laboratoire et voir le matériel permettant l'extraction des nématodes et surtout, voir ces petites bêtes en vrai !

Je remercie aussi les membres de la Chambre d'Agriculture du Var pour leur invitation à une réunion sur le compost et les contacts qu'ils nous ont donné. Grâce à eux nous avons pu travailler dans le secteur du Plan de la Tour présentant des sols sableux, type de sol dont nous manquions pour notre étude.

Je remercie Michel Nevière, représentant du Lycée agricole de Valabre qui nous a permis de mettre en place un essai pilote sur l'exploitation du lycée.

Et pour finir, je souhaite remercier tous les agriculteurs qui nous ont consacré de leur temps pour répondre à nos questions et mis à disposition leurs parcelles. Parmi eux, je remercie tout particulièrement Phanette Double grâce à qui nous avons pu mettre en place un essai pilote ainsi que Jacques Rapée, exploitant du domaine Les Fouques, avec qui nous avons souvent travaillé et mis en place l'essai pilote du Vallon des Borrels.

Avant-propos :

L'Europe prend conscience dans les années 2000 de l'importance du sol comme compartiment à part entière, une ressource non renouvelable à court et moyen termes, indispensable à la vie humaine. Cette prise de conscience entraîne une mobilisation importante de fonds pour financer la recherche sur ce milieu jusqu'alors mystérieux. Un but, tenter de comprendre le fonctionnement du sol afin de le gérer au mieux comme support durable et rentable de nos cultures.

Un des piliers méconnus de nos sols, l'activité biologique !

Un des piliers oublié et malmené de nos sols, la matière organique !

L'étude qui va vous être présentée ici s'inscrit dans ce contexte.

Sommaire

Introduction.....	1
I – Travaux antérieurs.....	3
I.1 Définitions générales.....	3
I.2 Le sol, un compartiment vivant.....	5
I.3 Les travaux réalisés sur les indicateurs du fonctionnement biologique des sols.....	8
II – Matériels et méthodes	12
II.1 Le compost, matière première outil de notre étude	12
II.2 Les conditions climatiques de la région PACA.....	13
II.3 Le réseau de parcelles disponible à l’essai	14
II.4 Prélèvement de sol et analyses.....	16
II.5 Indicateurs mesurés	17
III – Résultats et discussion	18
III.1 Le test bêche	18
III.2 La biomasse microbienne.....	19
III.3 La nématofaune	21
III.4 Le litterbag.....	23
III.5 Le Slake test.....	26
III.6 Confrontation des différents indicateurs	28
Conclusions et perspectives	30
Bibliographie	31
Annexes	34
Annexe 1 : Extrait du dossier de presse 2016 sur le Cabinet d’Agronomie Provençale	34
Annexe 2 : Présentation du projet REACTI-Sols	35
Annexe 3 : Dispositif expérimental de l’essai au lycée agricole de Valabre	38
Annexe 4 : Dispositif expérimental de l’essai au Château de Beaupré	39
Annexe 5 : Fiche protocole de mesure de la communauté lombricienne (extrait du site internet bio-indicateurs de l’université de Rennes) :.....	40
Annexe 6 : Fiche protocole du test bêche.....	44
Annexe 7 : Fiche protocole du test litterbag.....	46
Annexe 8 : Fiche protocole de mesure de la biomasse microbienne et de la diversité (extrait du site internet bio-indicateurs de l’université de Rennes) :.....	48
Annexe 9 : Fiche protocole de mesure de l’indicateur de la nématofaune (extrait Elisol) :.....	51
Annexe 10 : Devis pour la mesure de la biomasse microbienne ainsi que celle de la nématofaune	53
Annexe 11 : Tableau de synthèse du réseau parcellaire disponible à l’étude	56

Annexe 12 : Analyse SadeF du compost enrichi	57
Annexe 13 : Résultats d'analyses formule Diamant Elite et AT2	60
Annexe 14 : Tableau des différents paramètres issus de l'analyse de la nématofaune utilisés pour caractériser le fonctionnement biologique du sol	68
Annexe 15 : Exemple d'analyse de la nématofaune du sol par Elisol Environnement pour la parcelle du site de Beaupré traité avec du compost enrichi	69
Annexe 16 : Données Elisol Environnement des trois sites expérimentaux de Valabre, Beaupré, Vallon des Borrels.....	70
Annexe 17 : Données et graphiques relatifs à l'indicateur Litterbag.....	80
Annexe 18 : Tableau de données relatif à l'ACP pour l'indicateur Slake test	92
Annexe 19 : Script R.....	95
Annexe 20 : Tableau de données relatif à l'ACP regroupant tous les indicateurs	96
Annexe 21 : Résultats statistiques relatifs à l'ACP regroupant tous les indicateurs.....	96

Introduction

Pierre Guérin est conseiller en viticulture et œnologie au Cabinet d'Agronomie Provençale. Cabinet qui tient à cœur des termes tels qu'agriculture biologique, agriculture durable, biodiversité, qualité du sol, etc (cf annexe 1). Conseiller ses clients sur la qualité de leurs sols, les apports à effectuer en fumure de base ou d'entretien, résoudre les problèmes « classiques » des sols tels que l'érosion, le tassement, le manque de matières organiques, la mauvaise minéralisation fait partie du quotidien de son métier. Tous ses clients sont engagés en agriculture biologique et de plus en plus de domaines s'intéressent voir même se convertissent à l'agriculture biodynamique. C'est donc naturellement qu'il s'est tourné vers le compost. De plus, cela fait longtemps qu'il est convaincu que réaliser un compost à la ferme avec des déchets verts qui proviennent de la région permet d'améliorer le fonctionnement biologique du sol. Et cela mieux encore que des amendements conditionnés en granulés, souvent fabriqués avec une matière première étrangère et transportés sur de grandes distances car, pour lui, cela ne permet pas de maintenir en vie les organismes présents initialement dans le compost. Et quand bien même cette faune et flore serait toujours présente, elle serait adaptée à un environnement bien différent de celui que l'on peut retrouver dans les sols de la région PACA. Pierre a donc rapidement préféré conseiller à ses agriculteurs d'apporter du compost plutôt qu'un autre produit (matière organique en bouchons, matière minérale). Mais, il a été confronté à la concurrence des distributeurs et leur discours ainsi qu'aux interrogations des agriculteurs quant à l'efficacité du produit. Qu'est-ce que cela va apporter de plus à mon sol ? Est-ce que ma vigne ne va pas être carencée étant donné le faible NPK du compost ? etc.

Il était donc nécessaire de trouver des arguments en faveur du compost si tant est qu'il constitue effectivement un plus pour nos sols. Pour Pierre, le but est de trouver un ou plusieurs indicateurs permettant de montrer l'impact d'un changement de pratique (comme l'apport de compost) sur la biodiversité des sols.

Des opportunités de travail sur le sujet se sont créées avec la formation d'un réseau complet de partenaires.

Pierre Guérin travaille depuis 2011 avec Eric Navarro, gérant de la société Terre et Compost qui est spécialisée en amendements organiques. Elle propose un compost certifié biologique issu de centres de production agréés. Eric Navarro est lui-même intéressé par les problématiques évoquées précédemment ce qui permettra de faire fabriquer des composts à la demande à partir de 2013. Il a aussi créé en lien avec le bureau d'études spécialisé dans la valorisation de matières organiques par compostage nommé MicroTerra, un réseau de compostage de proximité : TerraPolis. TerraPolis est une filière durable de traitement et valorisation des déchets organiques végétaux ayant pour zone d'intervention : PACA, Languedoc Roussillon, Midi Pyrénées et Aquitaine. Ainsi, Pierre Guérin et Eric Navarro s'associent pour restaurer les sols de leur région. En effet, ceux-ci sont de plus en plus pauvres en matières organiques et « partent à la mer ».

Grâce à Eric Navarro, Pierre Guérin rencontre Michel Nevière, professeur en agronomie et responsable d'expérimentations au Lycée agricole de Valabre. Celui-ci lui propose de mettre en place une expérience sur une des parcelles du lycée, en collaboration avec les étudiants.

Il rencontre aussi Phanette Double, ancienne élève de Montpellier Supagro et propriétaire du domaine viticole Château de Beaupré, qui, conservant sa rigueur scientifique et soucieuse de faire

évoluer son domaine, propose à Pierre Guérin de mettre en place le même type d'expérience que celle du Lycée de Valabre sur son domaine.

Pour finir, Pierre Guérin participe à une réunion avec l'ADEME (agence de l'environnement et de la maîtrise de l'énergie) et le réseau TerraPolis pour parler du projet tout juste naissant. Cette agence est l'opérateur de l'État pour accompagner la transition écologique et énergétique. C'est un établissement public à caractère industriel et commercial (EPIC) placé sous tutelle conjointe du ministère de l'Environnement, de l'Énergie et de la Mer et du ministère de l'Éducation nationale, de l'Enseignement supérieur et de la Recherche. Elle aide en outre au financement de projets, de la recherche à la mise en œuvre, et ce, notamment dans les domaines de la gestion des déchets et de la préservation des sols. Elle se montre donc intéressée par celui porté par Pierre Guérin et Eric Navarro intitulé « Structuration d'une filière collaborative locale et pérenne de valorisation agricole des déchets organiques issus des territoires » (cf annexe 2). Il comprend trois volets :

- L'entretien des sols agricoles par l'apport important de matières organiques d'origine végétale et animale, locales et compostées s'inspirant des principes de l'économie circulaire.
- La mise en place d'indicateurs du fonctionnement biologique des sols
- Le développement d'une communication sur la qualité des composts proposés et sur la façon de les obtenir par des processus rustiques dits " bord de champ".

Le deuxième volet représente le sujet de ce mémoire. Le réseau de parcelles disponible sur lequel sont mis en place différentes modalités en termes d'amendement constitue le support des tests des bio-indicateurs. Le but est de pouvoir trouver un jeu d'indicateurs simple, robuste et praticable en routine. Il permettrait d'une part d'appuyer le discours aux agriculteurs comme, par exemple, l'intérêt d'utiliser le compost plutôt que de se limiter aux engrais trouvés dans le commerce et, d'autre part, de pouvoir aller plus loin dans la réflexion sur les sols. En effet, Pierre Guérin et Eric Navarro souhaitent ensuite améliorer leurs connaissances sur les composts car il est possible de jouer sur de nombreux facteurs : la matière première, le temps et le taux de compostage, l'humidité, etc. Ce set d'indicateurs serait utilisé en comparaison. Soit dans le temps soit dans l'espace.

Les attentes vis-à-vis des indicateurs peuvent être résumées comme suit :

- établir un bilan de fonctionnement biologique des sols
- vérifier que l'utilisation de compost est bénéfique
- accumuler des données régionales
- essayer de quantifier ces effets en termes de fertilité

C'est ainsi que dans ce mémoire nous nous proposons de mettre en place un jeu d'indicateurs du fonctionnement biologique du sol, simple et praticable en routine permettant de juger de « l'état de santé » d'un sol viticole en région PACA. Ce jeu d'indicateur servira, dans l'immédiat, à regarder l'impact biologique de l'utilisation de compost créé à partir de déchets frais de proximité.

Nous verrons tout d'abord les définitions liées au sol et les problématiques qui se posent face à l'étude de ce compartiment puis nous traiterons des matériels et méthodes de l'étude avant de finir par les résultats et discussions.

I – Travaux antérieurs

I.1 Définitions générales

Le sol

Il existe autant de définitions que d'intéressés au sol. En effet, la définition du sol va être très différente si l'on considère la vision du paysan qui laboure son champ, du promoteur immobilier, du citadin, etc. Nous allons ici choisir une vision scientifique du sol. La définition pédologique trouvée dans le Larousse, dictionnaire français, est la suivante :

« Formation naturelle de surface, meuble, résultant de la transformation, au contact de l'atmosphère, de la roche mère sous-jacente, sous l'influence des processus physiques, chimiques et biologiques »

Selon Gobat, J.M et al. (2013), le sol est caractérisé par de nombreuses caractéristiques : sa capacité à nourrir les plantes, à permettre la vie, sa soumission aux agents environnementaux, sa variabilité spatiale et temporelle, sa couleur, reflet de sa composition minéralogique, sa fertilité. Et cela a trait à trois éléments principaux :

- le sol est un carrefour multifonctionnel :

Par ses fonctions naturelles, le sol est un support pour les êtres vivants, un habitat à biodiversité très élevée, un réservoir de matières organiques et minérales, un régulateur des échanges et des flux dans l'écosystème, un lieu de transformation des matières minérales et organiques, un système épurateur des substances toxiques.

En rapport direct avec l'Homme, le sol est une des bases essentielles de la vie humaine, un lieu de la production agricole et forestière, un endroit de stockage de matières premières et de déchets, un élément constitutif du paysage, un miroir de l'histoire des civilisations et des cultures.

- le sol présente une organisation interne systémique

Le sol s'appréhende à diverses échelles spatiales (de la molécule aux horizons du sol) et temporelles (de la capture d'un atome de fer par une molécule organique quasi instantanée aux changements du pH global de l'ordre des décennies en passant par la dynamique des populations du sol comme les bactéries de l'ordre du jour).

Ainsi, de par son organisation et son fonctionnement, le sol est un système écologique auquel s'appliquent les propriétés habituelles des systèmes (respect des principes de la thermodynamique, nécessité de définir les limites du système, etc.)

- le sol abrite une « exclusivité » terrestre

En effet, ce compartiment est le seul à allier la matière minérale et la matière organique en un complexe : le complexe argilo-humique. Il associe les argiles et des polymères organiques (matière organique humifiée) grâce à un cation (généralement le calcium). Ce complexe est une clé de la fertilité du sol. Selon Gobat, J.M. et al. (2013) il procure au sol des propriétés nouvelles : une structure aérée et un stockage hydrique suffisant, une matière organique humifiée stabilisée, protégée d'une minéralisation rapide, des argiles stabilisées évitant le colmatage et la compaction du sol, une capacité du sol à retenir les bioéléments indispensables aux plantes augmentée.

Le sol, d'une épaisseur pouvant aller jusqu'à trois mètres, est composé d'une litière (principalement les sols forestiers) en surface qui représente la matière organique fraîche puis, d'une couche superficielle appelée épisolum humifère mesurant de 5 à 50 centimètres (Gobat, J.M., 2013). C'est la partie que nous allons principalement étudier car c'est la plus facile d'accès, c'est elle qui est directement soumise aux activités de l'homme car elle est à l'interface de l'atmosphère et du sol plus profond, c'est elle qui est susceptible de varier le plus rapidement sur des périodes de temps à échelle humaine. C'est là que l'activité de la faune et des microorganismes est la plus importante lorsque les conditions climatiques sont favorables. Même lorsque les conditions deviennent défavorables et que les organismes du sol s'enfoncent en profondeur, ils laissent des traces dans l'épisolum humifère (galeries, déchets, sécrétions) qui restent visibles et mesurables. Nous détaillerons ces aspects plus tard dans ce mémoire.

Qualité, santé, fertilité du sol ?

Le sol est un compartiment encore méconnu. Celui-ci est plus difficile d'étude que l'eau ou l'air. En effet, il est considéré par Blanchart (2010) comme la « troisième frontière biotique » au même titre que les grands fonds océaniques et les canopées des forêts équatoriales. De nombreux chercheurs ont tenté de définir la qualité d'un sol mais se sont heurtés au problème suivant : il n'existe pas une qualité de sol mais des qualités en fonction des objectifs de production et de l'écosystème dans lequel il se trouve. En effet, il existe une hétérogénéité des sols extrêmement importante. Dans ce mémoire nous n'avons pas la prétention de trouver l'indicateur de la qualité du sol mais un jeu d'indicateurs renseignant sur le fonctionnement biologique car nous allons voir que les organismes présents dans ce compartiment l'entretiennent. Ils influencent fortement les paramètres chimiques et physiques car ils en sont intimement liés (Franzle, 2006). Finalement, ils peuvent nous donner des informations sur une dégradation ou une amélioration du sol (Bispo et al., 2011) ou sur une qualité très générale du sol qui est décrite dans Agronomy News (1995) comme « sa capacité à fonctionner » avec fonctionner qui est défini en termes de propriétés et processus physiques, chimiques et biologiques. Ou la définition, souvent retrouvée, de Doran et Parkin (1994) « la qualité du sol est la capacité du sol à fonctionner dans les limites de l'écosystème, de supporter la productivité biologique, de maintenir la qualité de l'environnement et de promouvoir la santé animale et végétale ». Ou encore nous pouvons préférer à ce terme de qualité du sol le terme de santé du sol qui est similaire mais n'associe pas la notion de production. Selon Doran et Zeiss (2000) la santé du sol présente le sol comme une ressource vivante, finie et dynamique. La santé du sol préoccupe depuis peu. En effet, le sol n'est plus simplement considéré comme un support de l'agriculture mais comme une ressource non renouvelable à court et moyen terme, particulièrement menacé par les activités humaines et les changements climatiques. Nous pouvons citer le titre d'un article du quotidien « le Monde » paru en 2008 : « il est urgent de sauver les sols » (Galus 2008). Dans les huit menaces pour le sol, dénombrées par la Commission Européenne, nous retrouvons la diminution de la biodiversité (European Commission, 2006), souvent liée aux activités humaines, qui est au cœur de ce mémoire mais aussi d'autres menaces indirectement liées à la biodiversité comme l'érosion, la baisse des teneurs en matières organiques, le tassement des sols et les contaminations comme nous le verrons par la suite.

Des sols qui rassemblent les éléments des définitions données de qualité et santé du sol sont des sols forestiers puisque ceux-ci existent et fonctionnent en autonomie depuis plusieurs dizaines de millions d'années. La forêt de Bornéo est la plus ancienne connue avec ses 150 millions d'années

(Bourguignon, C., 2012). Ainsi, nous regarderons, par comparaison, le sol forestier pour se faire une idée des ordres de grandeurs à espérer.

Nous retrouvons aussi, lorsqu'on parle du sol, la notion de fertilité. Dans les années 70, le rendement représentait la mesure essentielle de la fertilité. Ainsi, les teneurs en éléments nutritifs du sol (N, P, K) furent prises comme indicateurs de la fertilité. On retrouve dans l'ouvrage de Gobat, J.M. et al. Une citation de Mulder et al. (in UNESCO, 1969) qui définissent la fertilité comme « l'aptitude du sol à entretenir la croissance des plantes agricoles ». Cette notion a évolué et prend en compte tous les éléments du sol définissant ainsi trois fertilités en permanentes interactions : chimique, physique et biologique avec comme clé de voute la matière organique (confère figure 1). Dans l'ouvrage cité

précédemment, on peut trouver une définition de la fertilité faite par Soltner en 2005 comme l'aptitude d'un sol à produire toute la chaîne alimentaire allant des microorganismes à l'homme, en passant par la plante et l'animal, et ceci pendant des générations.



Figure 1 : La fertilité du sol (extrait du poster réalisé par Mickaël Grevillot, chambre départementale 70)

Néanmoins, les études du fonctionnement du sol concernant certains changements cultureux sont rares et souvent restreintes à des zones géographiques limitées (Coll et al., 2011, 2012).

I.2 Le sol, un compartiment vivant

Le sol présente une extrême abondance et diversité d'organismes. Nous commençons à l'appréhender mais notre connaissance reste partielle. Selon Bally R. (2013), nous ne connaissons qu'environ 10% des microorganismes du sol.

Abondance, répartition, classifications et aperçu de la diversité taxonomique des individus du sol

Les estimations d'abondance trouvées dans la littérature varient considérablement selon les sols étudiés (composition, localisation géographique, climat, etc.). Néanmoins, selon Gobat et al. (2013) nous pouvons considérer qu'il y a en moyenne 150g d'animaux dans 1m² de sol prairial avec 1 g qui représente 16.10⁶ protozoaires ou 10⁶ nématodes ou 100 000 collemboles ou acariens ou 2 larves de tipules ou 0.25 escargot. En effet, la majorité des organismes du sol est de très petite taille. Il existe d'ailleurs une classification de ces organismes en fonction de celle-ci (figure 2).

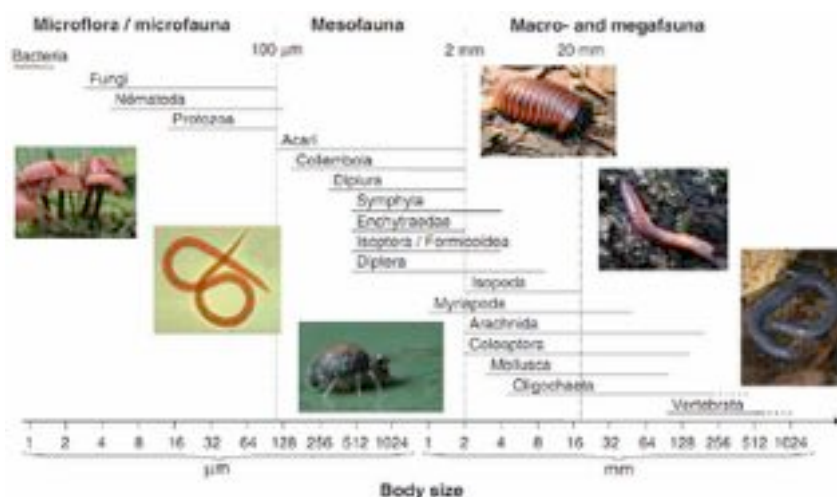


Figure 2 : Classement des individus du sol en fonction de leur taille. Extrait de la présentation de Decaëns, M. du laboratoire d'écologie de l'Université de Rouen. Journées nationales IPR - IGEN

Nous retrouvons aussi dans la littérature une distinction qui est souvent faite entre les microorganismes (bactéries et champignons) et la pédofaune. On emploie aussi le terme d'invertébrés du sol pour le second groupe.

Les bactéries sont retrouvées dans toute l'épaisseur du sol alors que les champignons, tous aérobies stricts sont épi-gés

(à la surface du sol ou à quelques centimètres en profondeur).

La pédofaune peut être épigée et endogée c'est-à-dire que nous retrouvons en surface et à plusieurs mètres sous le sol des acariens, collemboles, vers de terre, etc. Par leur activité, ils aèrent le sol en surface et en profondeur.

Entre les deux compartiments, la surface et la profondeur, les vers de terre anéciques font des navettes grâce à des galeries verticales. Dans les sols tropicaux, ce sont les termites qui remplacent les vers de terre anéciques.

Nous allons maintenant reprendre quelques chiffres de l'ouvrage écrit par Gobat, J.M. et al. (2013) pour avoir un aperçu de l'abondance et de la diversité des individus présents sous nos pieds :

- dans un pâturage supportant 2 à 3 unités de gros bétail par hectare (1800kg), la biomasse des vers de terre (1000 à 1500kg) est presque comparable
- la biomasse moyenne du sol est estimée à 2.5 t/ha
- la population de vers de terre varie de 100/m² dans des sols peu organiques à plus de 1000 dans des sols plus riches (pour un poids de 500 à 5000 kg/ha)
- la biomasse microbienne est estimée à 10⁹ germes vivants/g de sol soit une biomasse plus modeste de 500 µg/g de sol.
- enfin, dans des cas extrêmes, on trouve près de 30 millions de nématodes par m²

Fonctions écologiques

Diverses fonctions indispensables au maintien et au bon fonctionnement du sol sont réalisées par les organismes. En voilà les principales :

- Le macrobrassage ou bioturbation qui correspond au brassage de grandes quantités de terre, ramène en surface les horizons riches en matières minérales et enfouie les horizons organiques superficiels. Ceci est réalisé par les vers de terre anéciques, les fourmis, les termites, les scarabées et certains mammifères (taupes, campagnoles, chiens de prairie, etc.). Par exemple, nous pouvons citer les fourmis champignonnistes *Atta spp.* qui forment dans le sol une cavité avec de nombreuses chambres dont les déblais sont évacués en

surface aux alentours. Pour le creusage d'un nid, 22.7 m³ de terre pesant environ 40 tonnes ont été remués (Gobat, J.M., et al., 2013) !

- Ces mêmes individus permettent l'aération et le drainage des sols. En effet, ils forent des réseaux permanents de longueur parfois considérable, augmentant ainsi la macroporosité de 20 à 100%. On estime que les vers de terre creusent de 400 à 500 mètres de galeries sous un mètre carré de prairie, soit un volume de 5 à 9 dm³. Dans les 40 premiers centimètres, où elles sont les plus denses, ces galeries représentent jusqu'à 3% du volume total. Dans ces conditions, la capacité hydrique peut augmenter de 80% et la pénétration de l'eau être de quatre à dix fois plus rapide (Gobat, J.M., et al., 2013).
- Le traitement de la matière organique fraîche qui permet l'apport d'éléments minéraux nutritifs au sol et l'apport d'humus permettant la formation d'agrégats stables. En effet, la matière organique qui se dépose naturellement sur le sol (déchets animaux, organismes morts, déchets végétaux) ou apportée par l'homme (engrais ou amendements organiques dont les composts font partis) sont pris en charge par les êtres vivants du sol. La macrofaune et mésofaune fragmentent la matière organique augmentant la surface d'attaque permettant ensuite son traitement par la microfaune et les microorganismes. Leur action permet aussi un microbrassage de la matière organique par la déjection de petites crottes qui sont lessivées entraînant celles-ci en profondeur. Ensuite, la matière organique est traitée par les bactéries qui la minéralisent en se servant du carbone comme source d'énergie. Elles permettent, de ce fait, un stockage du carbone dans les sols et représentent elles-mêmes une réserve de nutriments à court terme (Ranjard, L., 2015). Elles rendent disponible ces éléments dans le sol qui sont indispensables à certains organismes et surtout à la nutrition des végétaux. Les champignons, eux, permettent la formation d'humus stable en sécrétant des enzymes extracellulaires pour traiter la matière organique. C'est cet humus qui se lie aux argiles à l'aide du calcium et stabilise le sol (Gobat, J.M., 2013). Cet ion possède deux charges positives qui peuvent établir des ponts ioniques entre les humines d'une part et les argiles d'autre part, tous deux chargés négativement. La rencontre entre les argiles (formés en profondeur par déstructuration de la roche mère) et l'humus (formé au niveau de l'épisolium humifère) est le résultat de l'activité des vers de terre anéciques qui font des navettes entre ces deux compartiments. De plus, ces vers possèdent une glande (la glande de Morren) riche en calcium qui favorise la liaison intime entre ces matières organiques et minérales (Bourguignon, C., 2012) permettant tous les avantages mentionnés dans la première partie sur la définition du sol et son « exclusivité » terrestre. Ainsi la structure du sol est conditionnée par les champignons en générale, les vers de terre anéciques mais aussi les bactéries et un groupe plus particulier de champignons : les champignons mycorhiziens. Les bactéries minéralisent la matière organique conduisant donc à sa destruction mais en contrepartie, certaines bactéries produisent de la matière organique stable appelée humine microbienne. Elles fabriquent et sécrètent des quantités parfois importantes de biopolymères qualifiés d'« exopolymeric substances » ou EPS, principalement des polysaccharides. Ces molécules sont très stables et représentent une portion importante de la matière organique stable du sol ce qui participe à la stabilité des agrégats constitutifs de celui-ci (Gobat, J.M., et al., 2013). Ces agrégats sont stabilisés et leur formation est favorisée par la gomaline, une glycoprotéine découverte en 1996 par la chercheuse Sarah F. Wright du USDA (United States Department of Agriculture). Cette protéine, communément appelée « colle du sol », est produite et sécrétée par les champignons mycorhiziens. Elle est très

stable, elle peut perdurer entre 6 et 42 ans permettant son accumulation dans les sols. Elle agirait en se liant aux fines particules d'argiles, de limons et aux particules organiques. Sa concentration est favorisée par un sol peu travaillé et une teneur en matière organique importante (Wright, S.F., et al. 1998 ; Wright, S.F., Upadhyaya, A., 1999 ; Rillig, M.C., et al. 1999).

- L'autocontrôle des populations par la prédation.

Ainsi, nous avons pu voir que les populations du compartiment sol sont indispensables à son fonctionnement et leur présence et leur développement permet d'aller dans le sens d'une diminution des principales menaces actuelles du sol. En effet, favoriser la biodiversité permet, entre autres, d'incorporer et stabiliser la matière organique dans les sols, de limiter les risques d'érosion en favorisant la formation d'agrégats stables, de limiter le tassement par la présence de ces agrégats stables et en cas de tassement, d'aller dans le sens d'une évolution positive de ce problème par l'action de micro et macrobrassage produit par les organismes du sol, de retenir les éléments polluants et de les dégrader. Bien entendu, ces phénomènes sont longs et c'est en cela que le sol est considéré comme une ressource non renouvelable à court et moyen terme. De plus ils ne sont pas le simple fait des organismes du sol mais dépendent de tous les facteurs environnant, des pratiques agricoles ainsi que du matériel végétal recouvrant le sol ou non. Il est donc nécessaire de s'intéresser rapidement au système sol en trouvant des indicateurs permettant d'appréhender de façon globale leur complexité et ainsi de valider ou d'infirmer le bienfondé de nos pratiques agricoles à long termes.

I.3 Les travaux réalisés sur les indicateurs du fonctionnement biologique des sols

Tout d'abord, définissons ce qu'est un indicateur. Selon Gras et al. (1989), "un indicateur est une variable qui donne de l'information sur d'autres variables difficilement accessibles [...] et qui peut être utilisée comme marqueur pour prendre une décision". Ils peuvent provenir de variables mesurées, d'indices calculés, ou être basés sur des systèmes experts (Girardin et al., 1999). Dans le cas particulier des sols, les indicateurs sont principalement issus de données mesurées bien qu'il existe quelques indices calculés. C'est le cas par exemple de l'indicateur de la nématofaune dont nous reparlerons plus tard. Selon Doran et al. (1996), un indicateur doit :

- prendre en compte les processus de l'écosystème
- intégrer des propriétés physiques, chimiques et biologiques
- être accessible aux utilisateurs et applicable au champ, techniquement et économiquement
- être sensible aux variations de gestion des systèmes et de climat, à une échelle de temps appropriée
- si possible, être déjà disponible dans des bases de données sur le sol

Dans le sol, selon Salome, C. et al. (2014) nous pouvons distinguer deux types d'indicateurs :

- les indicateurs de la qualité inhérente du sol. Ce sont les éléments qui ne varient pas à l'échelle de temps humaine. Ils dépendent fortement des processus de pédogénèse. Nous pouvons citer la piérosité, la taille des particules, la profondeur du sol, la teneur en carbonate de calcium.
- Les indicateurs de la qualité dynamique du sol. Ces éléments varient à des échelles de temps plus courtes. Ils sont constitués par des paramètres chimiques, physiques et depuis peu, biologiques. La valeur de ces paramètres dépend fortement de la valeur de ceux inhérents du

sol. Ainsi, pour que ces chiffres soient parlant, il faudra soit déterminer les caractéristiques inhérentes du sol étudié soit mesurer les paramètres dynamiques du sol cible et d'un sol voisin en comparaison. En effet, les caractéristiques inhérentes étant similaires, les différences en termes de paramètres dynamiques vont varier uniquement en fonction des pratiques viticoles.

Il faut attendre Doran et Parkin (1994) et Doran et Safley (1997) pour ajouter aux MDS (minimum data set ou jeu de données minimum permettant d'évaluer la qualité d'un sol) des propriétés biologiques telles que la respiration du sol ou le carbone microbien (Cécillon, L., 2009). Ainsi, les indicateurs biologiques ou encore bio-indicateurs se sont développés relativement tardivement. Ils sont donc méconnus des professionnels et d'autre part, la plupart sont cantonnés au stade de la recherche fondamentale. C'est-à-dire que les analyses ne sont souvent pas normalisées ou il n'existe pas de référentiel. Elles ne sont pas non plus disponibles en routine et sont par conséquent très chères. De plus, selon Cécillon L. (2009) les MDS actuelles ne justifient parfois plus vraiment leur nom (la méthode GISQ, indicateur général de la qualité du sol, exige la quantification de 54 variables pour le calcul de cinq sous-indicateurs spécifiques) ce qui dissuade tout agriculteur d'essayer d'avoir accès à une indication sur le fonctionnement biologique de son sol.

Néanmoins, de nombreux programmes de recherche se sont mis en place pour établir et étudier ces bio-indicateurs grâce à une prise de conscience de l'importance de la biologie des sols récente et donc des financements débloqués à cet égard. Il en résulte un très large choix dont nous pouvons apprécier la diversité sur le site internet bio-indicateurs de l'université de Rennes (<https://ecobiosoil.univ-rennes1.fr/ADEME-Bioindicateur/index.php>) mis en place suite au programme de recherche national lancé par l'ADEME pour les développer. Ils sont considérés par Bastida, F. et al. (2008) Fränzle, O. (2006) capable de fournir une image générale de la qualité des sols grâce au fait qu'ils ont une sensibilité plus importante aux changements environnementaux que les indicateurs physiques ou chimiques.

En questionnant la bibliographie, nous pouvons observer qu'un projet à peu près similaire au nôtre a vu le jour en Janvier 2012. Le projet Agrinnov qui allie des chercheurs, formateurs, du développement agricole et de nombreux partenaires financeurs des actions réalisées. Ce projet a pour mission d'allier le monde de la recherche et le monde agricole par la mise en place d'outils opérationnels de type bioindicateurs pour équiper les agriculteurs afin qu'ils puissent évaluer l'impact de leurs pratiques sur la biologie de leur sol. L'équipe du projet a sélectionné cinq bioindicateurs :

- La communauté lombricienne (annexe 5)
- Le test bêche (annexe 6)
- Le litterbag (annexe 7)
- La biomasse microbienne ainsi que leur diversité (annexe 8)
- La nématofaune (annexe 9)

En parallèle des paramètres physico-chimiques (texture, pH, etc.) sont déterminés de façon à créer une base de données de ces bioindicateurs en fonction du type de sol mise en ligne sur l'observatoire français des sols vivants (OFSV). Leur site n'est pas fonctionnel pour le moment. Nous pouvons cependant avoir accès à la présentation du projet sur le site internet Genosol.

Nous avons donc choisi de regarder et tester certains de ces bioindicateurs dans la région PACA, auprès de nos agriculteurs, pour voir comment ils réagissent et si ils sont satisfaisant en termes de facilité de mise en œuvre, rapidité, robustesse, prix et visibilité. Le test bêche et le litterbag sont deux indicateurs qui semblent peu coûteux et très simples à mettre en place. Le test bêche est un mini-profil cultural qui donne un état des lieux général du sol. Lors de ce test, l'aspect de surface, la structure, la continuité des horizons ou non, la couleur, l'odeur, etc. sont notés. Le test litterbag consiste, lui, en une mesure de la cinétique de décomposition de la matière organique dans le sol. Le test consiste à enfouir, pour une durée déterminée, dans la zone superficielle du sol (zone de forte activité du vivant) des sachets à maille très fine, permettant le passage de micro-organismes, contenant de la matière organique. Ces deux indicateurs seront mis en œuvre.

La communauté lombricienne semble être un bon indicateur d'autant qu'elle fait partie de la pédofaune connue des agriculteurs. Le test est simple mais chronophage et gourmand en moutarde et en eau. En effet, par répétition il est nécessaire d'arroser trois fois une surface de 1m² avec 10 l d'eau mélangés avec 150 g de moutarde. Les répétitions sont espacées de 10 minutes. Une fois l'arrosage terminé les individus sont dénombrés et identifiés à la surface du sol et dans un bloc de sol de 0.25×0.25×0.20. Néanmoins, la période d'essai (mai à septembre) ne nous permet pas de tester cet indicateur. En effet, les conditions météorologiques (chaleur et sécheresse) entraînent une fuite de cette communauté en profondeur.

A ces indicateurs est rajouté la mesure du slake test ou test de sédimentation. Il a été mis en place par l'USDA (United States Department of Agriculture). Il permet avec un matériel très simple (éprouvette, grille, eau) de mettre en lumière la stabilité structurale du sol. C'est un test très visuel et très parlant pour les agriculteurs. Il montre en temps réel l'érosion que peut entraîner une forte pluie sur nos sols. Aucune bibliographie établie précisément la durée du test ni comment attribuer une donnée quantitative à cette méthode à part une norme AFNOR faisant appelle à une méthode longue et du matériel de laboratoire assez lourd ne correspondant pas au but de notre étude. La méthode sera étalonné au cours de cette étude (confère partie II.5).

En consultant de nombreux travaux sur le sujet, thèses et publications (C. Janvier, 2007 ; P. Coll et al., 2011 ; P. Coll, 2011 ; C. Salome et al., 2014 ; C. Salome et al., 2016) ainsi que le projet Agrinnov ou le projet RMQS BioDiv réalisé en Bretagne entre 2006 et 2009, il est aisé de constater que deux bioindicateurs reviennent systématiquement : la biomasse microbienne ainsi que la nématofaune.

La biomasse microbienne est un indicateur du bon fonctionnement du sol. Comme nous l'avons vu dans la première partie, celle-ci permet la minéralisation de la matière organique servant ainsi la fertilité du sol. Cet indicateur est, selon Ranjard, L. (2015) robuste, sensible et précoce (temps de réaction de l'indicateur de l'ordre de la semaine). Cet indicateur est dépendant des pratiques agricoles. Par exemple, l'abondance des bactéries serait diminuée par un labour trop important.

Selon Ferris, H. et al. (2001) et Villenave, C. et al. (2013) la nématofaune est un indicateur intéressant car il permet de fournir de nombreux renseignements. En effet, les nématodes sont ubiquistes, ils sont présents dans tous les sols et tous les milieux. De plus, ils se placent à différents niveaux de la chaîne trophique. Ainsi, leur caractérisation donne une information sur l'ensemble du réseau trophique du sol. Ils sont aussi sensibles, de façon variable, aux conditions du milieu et aux perturbations physiques et chimiques.

Les nématodes sont classés selon leur groupe trophique. Il en existe six différents : les phytophages obligatoires et facultatifs, les bactérivores, les omnivores les fongivores et les carnivores. Ces groupes ne possèdent pas les mêmes caractéristiques et vont ainsi permettre de calculer différents indices qui renseignent sur la « qualité » du sol :

- SI : Indice de Structure qui reflète la stabilité du milieu, plus il est élevé moins le milieu est perturbé. Il est fonction de l'abondance relative de plusieurs familles (les bactérivores, les fongivores, les omnivores et les prédateurs) ;
- EI : Indice d'Enrichissement qui donne une indication sur la dynamique des éléments nutritifs. Cet indice est particulièrement utile dans les agrosystèmes. L'EI augmente avec la disponibilité en nutriments, et en particulier l'azote.
- d'autres indices, MI (Indice de Maturité), PPI

(Indice des nématodes Phytophages), BI (Indice basal) et IVD (Indice des Voies de Décomposition de la matière organique) sont également utilisés pour déterminer l'effet de différentes perturbations / stress / pratiques sur le sol.

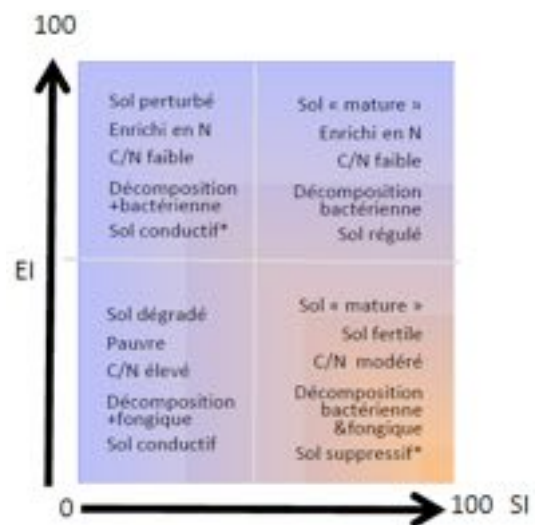


Figure 3 : Diagnostic du micro réseau trophique du sol (Ferris, H. et al., 2001)

La représentation de EI en fonction de SI permet d'interpréter ces deux indices et de caractériser quatre grands types de fonctionnement biologique du sol en fonction des valeurs prises (cf figure 3).

La diversité taxonomique est évaluée par le nombre de familles de nématodes ou l'indice de Shannon et des empreintes métaboliques des assemblages de nématodes peuvent aussi être renseignées. Elles fournissent des mesures en fonction du poids et pas seulement de l'abondance ce qui est plus juste lorsque l'on raisonne en termes de services écosystémiques rendus.

Les nématodes sont aussi regroupés selon leurs comportements alimentaires. Ils sont séparés en 5 classes allant de 1, colonisateurs ou opportunistes (nématodes pouvant exploiter de nouvelles ressources rapidement, ayant des cycles de vie courts, produisant de petits et nombreux œufs, peu sensibles au stress) à 5, persistants ou sensibles (nématodes ayant des cycles de vie de plusieurs mois, produisant peu de gros œufs, sensibles aux perturbations). Ces classes sont attribuées de façon empirique au genre des nématodes identifiés

Ces bioindicateurs seront donc mesurés au cours de cette étude, au sein du réseau de parcelles mis en place. Bien que les analyses en laboratoire soient relativement chères pour être mesurées en routine (cf annexe 10), elles restent pratiques pour les agriculteurs car la méthode de prélèvement est très simple (confère partie II.4).

II – Matériels et méthodes

II.1 Le compost, matière première outil de notre étude

Nous avons choisi, dans nos parcelles expérimentales de tester comme changement de pratique culturale l'apport de compost. D'une part, par esprit pratique. Eric Navarro de la société Terre&Compost permet un accès facile à différents types de matières végétales (fraîche, compost végétal, compost enrichi). Ensuite, cette étude s'inscrit dans une étude plus large ayant pour but d'amener les agriculteurs à apporter du compost dans leurs parcelles viticoles plutôt que d'autres matières de type fertilisants organiques conditionnés en pellets ou fertilisants minéraux. L'hypothèse suivante est émise : le compost permet (Martinez-Blanco, J. et al., 2013), en comparaison avec les autres apports, d'augmenter les taux de matière organique du sol et de favoriser la vie du sol et par conséquent de limiter l'érosion, favoriser une structure décompactée du sol, assurer une nutrition des végétaux optimale etc. (cf partie I.1, sous partie fonctions écologiques). Néanmoins, même si ce postulat apparaît être une évidence, le sol n'est pas un système binaire et il convient donc de le vérifier. Vérifier qu'en apportant du compost l'équilibre de l'écosystème n'est pas perturbé. En effet, l'objectif est de favoriser la vie du sol en général, dans sa globalité, d'où l'importance de considérer un maximum de bioindicateurs renseignant sur les populations mais aussi sur leurs impacts sur le sol en lui-même donc sur les paramètres physiques et chimiques. A titre d'exemple, nous pouvons imaginer que le compost favorise l'activité microbienne mais défavorise toutes les autres populations créant ainsi un déséquilibre en terme de biodiversité avec ses conséquences physiques (faible macrobrassage par exemple) et chimiques (trop forte minéralisation de la matière organique ne permettant pas d'augmenter son taux dans le sol et donc maintien des problèmes d'érosion, de tassement, etc.). Si le seul paramètre biomasse microbienne était mesuré la conclusion qui en ressortirait serait « le compost favorise la vie du sol et donc son fonctionnement » alors qu'en réalité il n'en est rien.

Intéressons-nous donc au compost. Que contient-il ? Et donc que peut-on en attendre ? Comment le caractériser ? Quels sont les différents compost que l'on peut trouver ?

Selon Gobat, J.M., 2013, le compost modifie considérablement les propriétés physiques, chimiques et biologiques du sol, à court et à long termes.

- Physique : les matières polyphénoliques humigènes structurent le sol. La masse volumique apparente diminue et donc la porosité augmente favorisant ainsi l'aération. La capacité de rétention en eau ainsi que la stabilité structurale se voient augmentées.
- Chimique : l'apport de matières humigènes augmente la capacité d'échange cationique ce qui favorise la nutrition des plantes et s'oppose à la lixiviation. On utilise d'ailleurs l'apport de matière organique en cas de pollution des sols pour retenir les éléments contaminants en surface et favoriser leur biodégradation. Les sels minéraux des composts leur confèrent un pouvoir tampon ce qui stabilise les sols en terme de pH et neutralise les sols trop acides.
- Biologique : les composts renferment une communauté importante et diversifiée de microorganismes mésophiles (qui prospèrent dans des conditions de température modérée). Toujours selon Gobat, J.M. (2013) peu d'études ont été menées sur la capacité de se maintenir à long terme de ces microorganismes dans les sols après apport de compost. Néanmoins, l'apport de nutriments permet, à l'image d'une litière, le développement voir une modification de la faune indigène.

Le compost est souvent caractérisé par deux indicateurs :

- Le rapport C/N. Au court du compostage, le substrat perd essentiellement du carbone sous forme de dioxyde de carbone. Au vue des pertes relativement faibles en azote, le rapport C/N diminue avec la maturation du compost. Ainsi, plus un compost est mûr, plus son rapport C/N est faible. Un compost qualifié de « mûr » a un rapport C/N compris entre 10 et 20 par rapport à un compost dit « jeune » qui a un rapport plus élevé pour une même matière première, excédent rarement 30. Pour exemple, le rapport C/N de l'urine est de 1 alors que celui d'une paille de blé de 100 à 150.
- L'ISMO, nouvel indice paru en 2010 pour remplacer l'ISB/CBM. Il représente la stabilité de la matière organique. Il est calculé à partir des résultats de la méthode de fractionnement biochimique et estimation de la stabilité biologique (Hubert, G. et al., 2011).

Un compost peut varier suivant différent paramètres :

- La matière première, plus ou moins riche en éléments humigènes. Par exemple, un compost issu de déchets ménagers de type légumes, pauvre en lignine et cellulose, a plus valeur de fertilisant que d'amendement.
- Le taux de maturation (un rapport C/N plus ou moins élevé). Un fumier jeune est composé de matières organiques riches en énergie rapides qui peuvent activer facilement la vie microbienne alors qu'un fumier mûr est composé de matières organiques précurseurs d'humus stable qui vont former des complexes argilo-humiques.
- Les apports. En effet, il est possible par exemple d'apporter du fumier dans des proportions variables au compost pour augmenter les paramètres NPK poursuivant un but de fertilisation en plus de l'amendement effectué. De plus, on suppose qu'apporter du fumier permet d'augmenter la biodiversité du compost et donc certainement celle du sol par la suite. Ceci est une simple hypothèse et reste à vérifier par l'expérimentation.

Le compost apporté sur les parcelles expérimentales mises en place cette année (cf partie II.3) est un mélange de matières premières végétales broyées, criblées, enrichies avec du fumier puis compostées en andain avec arrosage. Ainsi, le compost obtenu est un compost enrichi, mûr (confère annexe 12). Ce type de compost a été choisi car le but est d'amender le sol et non de le fertiliser, l'impact de cette pratique à long terme est recherché. L'enrichissement pratiqué a pour but d'une part d'augmenter les paramètres NPK afin de « rassurer » l'agriculteur et d'autre part de confirmer ou d'infirmer l'hypothèse émise précédemment. De plus, ce type de compost est préconisé par un certain nombre d'agronomes, nous souhaitons donc le tester à moyen et long termes. Les sols enrichis avec ce compost seront comparés avec des sols enrichis avec du compost purement végétal mais aussi des sols enrichis avec des matières organiques en pellets ou des matières minérales ou des sols témoins, non enrichis.

II.2 Les conditions climatiques de la région PACA

Le climat de la région Provence Alpes Côte d'Azur est typiquement méditerranéen avec une température annuelle moyenne de 19,5°C et une pluviométrie annuelle moyenne de 687,2 mm (moyennes basées sur les données Météo-France de l'année 2015 relevées sur sept stations météorologiques représentatives de la région).

Particulièrement cette année, le climat a été très sec de avril à aout. Les données du site infoclimat 2016 nous donnent :

- A Hyères (proche du site du Vallon des Borrels), la station météorologique du Palyvestre donne un cumul de 92.8mm du mois d'avril au mois d'août compris
- A Aix-en-Provence (proche des sites de Valabre et Beaupré) un cumul de 81 mm du mois d'avril au mois d'août compris

Ceci est confirmé par les sondes Watermark installées à Valabre qui ont affiché de leur installation le 02 juin à la fin des expérimentations en septembre « dry ».

II.3 Le réseau de parcelles disponible à l'essai

Deux essais avec un protocole expérimental rigoureux ont été mis en place au Lycée agricole de Valabre et au Château de Beaupré mi-mars 2016 et un troisième début juillet 2016 sur une parcelle destinée au maraîchage. Ces trois sites expérimentaux constituent le principal support des indicateurs à tester. En effet, nous avons un libre accès aux parcelles, une information complète sur les pratiques agricoles effectuées et un pouvoir décisionnaire sur celles à effectuer par la suite. En complément, des parcelles présentant des intérêts en termes de propriétés inhérentes du sol ainsi que de pratiques culturales spécifiques sont mis à disposition par des exploitations agricoles partenaires du projet et/ou clientes du Cabinet d'Agronomie Provençale ou membres de la Chambre d'Agriculture du Var. c'est le cas pour les domaines Les Fouques, Cazal, les 3 Chênes sur lesquels de nombreux essais ont été conduits.

Protocole expérimental de Valabre (cf annexe 3)

- Modalités testées :

T0 : témoin sans matières végétales ni aucune fertilisation

T1 : matières végétales non compostées (8-10 cm d'épaisseur)

T2 : matières végétales compostées (10 t/ha)

T3 : matières végétales compostées, enrichies (3t/ha)

Dans le cas de la modalité T3, le compost est épandu sur le rang étant donné la faible quantité de matière apportée (3t/ha)

- Dispositif :

Bloc à 3 répétitions permettant une interprétation statistique des résultats.

- Taille des parcelles élémentaire :

Largeur : 3 rangs de vignes et donc 4 inter rangs (2 travaillés et 2 non travaillés) soit 10 mètres de largeur.

Longueur : 10 mètres

Un inter rang est laissé en zone tampon entre chaque parcelle élémentaire.

Un tampon de 4 mètres est laissé entre chaque bloc.

En plus des modalités testées, nous pouvons considérer, pour chaque modalité, l'aspect enherbé ou travaillé mécaniquement du rang. En effet, la parcelle présente un inter-rang sur deux, enherbé spontanément de façon permanente. Cela depuis 2006.

Protocole expérimental de Beaupré (cf annexe 4)

- Modalités testées :

T0 : témoin sans matières végétales ni aucune fertilisation

T1 : matières végétales compostées, enrichies (3t/ha)

T2 : Bochevo (1t/ha)

- Dispositif :

Deux parcelles voisines sont soumises à l'essai : Grenache 1.2 « Grand Vaccant » et Syrah 5.1 « Chemin »

Sur la parcelle Grenache 1.2 « Grand Vaccant », une seule modalité par bloc

Sur la parcelle Syrah 5.1 « Chemin », une seule modalité pour T0 et deux modalités pour les deux autres modalités de façon à gommer l'effet pente.

- Taille des parcelles élémentaire :

Grenache 1.2 « Grand Vaccant » : blocs T1 et T2 de 15 rangs de vigne avec T0 entre les deux modalités comptant 9 rangs de vigne.

Syrah 5.1 « Chemin » : blocs T1 et T2 de 8 rangs de vigne avec T0 entre les deux modalités comptant 4 rangs de vigne.

Protocole expérimental de La Celle

Judith Ricard s'est vue attribuer par la mairie de la Celle, via la SAFER (société d'aménagement foncier et d'établissement rural), une parcelle destinée à la culture maraîchère. En jachère depuis une vingtaine d'années, les employés municipaux ont sous-solés cette parcelle en mai 2016. Depuis, celle-ci est en repos total hormis la livraison de bennes de déchets organiques frais autour du 15 juin 2016 par la société Terre et Compost occasionnant un tassement du sol localisé.

Les différentes modalités disponibles à l'expérimentation sont :

- Témoin : le sol de la parcelle évoluant librement
- Couvert végétal : la matière organique fraîche est épandue sur le sol de façon à le recouvrir avec une épaisseur de 5 à 10 cm
- Couvert végétal arrosé La parcelle de vigne accolée appartenant à Valérie Pourchier
- Témoin forestier à côté de la parcelle

Cependant, ce site expérimental sera peu utilisé cette année d'étude étant donné sa très récente création et les faibles moyens en temps et en argent de Judith Ricard qui n'ont pas permis de mettre en place les modalités couvert végétal et couvert végétal arrosé.

Protocole expérimental du Vallon des Borrels

Les sites expérimentaux précédemment décrit ont reçu des traitements particuliers pour former différentes placettes mais cela seulement récemment, au cours de l'année 2016. Nous allons suivre ces placettes et leur évolution, en termes de biodiversité du sol, dans le temps. Néanmoins, pour cette année d'étude nous n'espérons pas obtenir des résultats très différents entre les modalités hormis concernant quelques bioindicateurs qui réagissent rapidement ou pour des bioindicateurs testés entre les inter-rang enherbés et travaillés. C'est pourquoi nous allons aussi tester les bioindicateurs dans la vallée des Borrels sur trois domaines dont un, le domaine Les Fouques, qui possède des parcelles conduites en biodynamie depuis 5 ans ou 27 ans avec apport de compost enrichi annuel. Les autres domaines possèdent des parcelles attenantes à celles étudiées du domaine Les Fouques qui sont conduites en agriculture conventionnelle. Les parcelles pourront être comparées entre elles car il est raisonnablement possible de supposer qu'elles possèdent les mêmes caractéristiques inhérentes.

Les quatre parcelles étudiées sont :

- Pumant (domaine Les Fouques) conduite en biodynamie depuis 1989 ans
- La parcelle accolée, Janin (domaine Cazal), conduite en conventionnelle 2001
- Condroyer (domaine Les Fouques) conduite en biodynamie depuis 2011
- La parcelle accolée, Le Puit (domaine les 3 Chênes), conduite en conventionnelle depuis 1965

L'annexe 11 donne la présentation et l'historique du réseau parcellaire disponible à l'étude.

II.4 Prélèvement de sol et analyses

Les prélèvements de sol sont effectués dans l'horizon de surface (0-15 cm où est concentré un maximum d'abondance et de diversité en termes d'organismes du sol). Les échantillons sont prélevés au milieu de l'inter-rang sur chaque parcelle de vigne ou sur chaque placette lorsque plusieurs placettes par modalité ont été mises en place. Les échantillons prélevés sur chaque placette sont ensuite réunis pour n'en laisser qu'un par modalité. Des échantillons des composts sont aussi prélevés.

Lorsqu'une couche de matière organique est présente à la surface (c'est le cas pour la modalité T1 du site de Valabre), elle est retirée au préalable.

Sur la parcelle du site de Valabre, deux échantillons sont prélevés par modalité. Un dans l'inter-rang travaillé et l'autre dans celui enherbé. Par modalité, 12 carottes de 17 cm de hauteur sont prélevées à l'aide d'une tarière à main : 4 carottes par placette (cf figure 4). Les carottes sont homogénéisées dans un sceau avant de prélever l'échantillon à envoyer aux laboratoires.

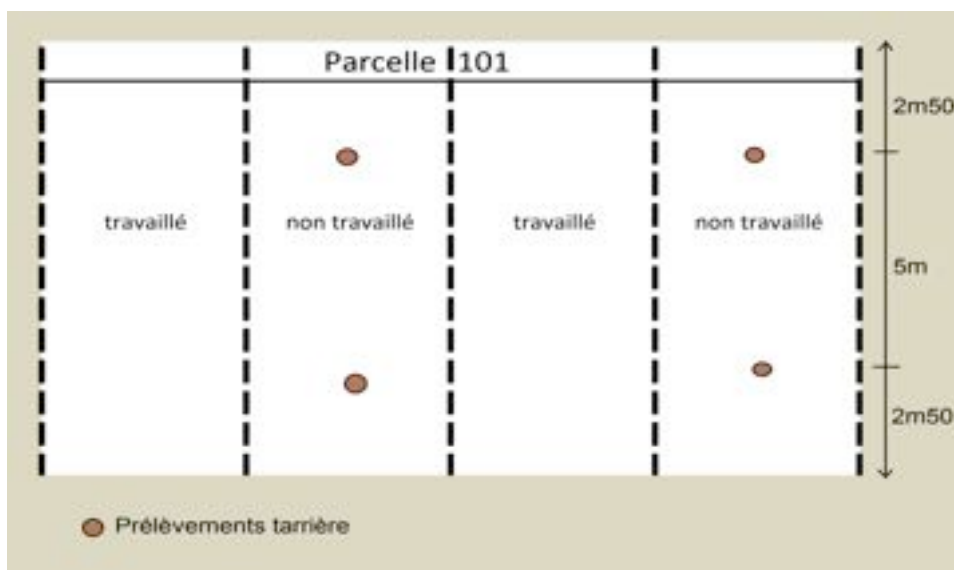


Figure 4 : Mode de prélèvement des échantillons de terre par placette

La modalité compost fermier enrichi ne sera pas testée sur cette parcelle étant donné que la matière a été épandue sur le rang et non dans l'inter-rang. A cette échelle de temps, elle est considérée similaire à la modalité témoin en prélevant dans l'inter-rang. Cette modalité est testée sur le site de Beaupré où le compost a été épandue sur l'inter-rang.

Sur la parcelle de syrah 5.1 « Chemin » et les parcelles du site des Borrels, un seul échantillon est prélevé par modalité (tous les rangs sont travaillés mécaniquement). 12 carottes de 17 cm de hauteur sont prélevées à l'aide d'une tarière à main au milieu de l'inter-rang. 6 carottes par inter-

rang sont effectuées (donc sur 2 inter-rangs par modalité) réparties à égale distance les unes des autres sur la totalité de l'inter-rang.

Ces échantillons de sol seront ensuite analysés par :

- Le laboratoire Celesta-lab pour obtenir une brève caractérisation physico-chimique, la biomasse microbienne ainsi que la caractérisation des matières organiques.
- Le laboratoire Elisol pour obtenir l'abondance de nématodes en fonction de leur classe trophique et de calculer les différents indices vu précédemment.

II.5 Indicateurs mesurés

L'indicateur test bêche est mesuré sur le réseau parcellaire suivant le protocole établi (cf annexes 6).

La mesure en continue de la tension de l'eau du sol (pression exercée par la plante pour extraire l'eau du sol en centibar) est réalisée sur le site expérimental de Valabre à l'aide d'une sonde Watermark (cf annexe 3). L'activité biologique du sol étant fortement dépendante de l'humidité du sol, ces sondes vont nous permettre d'avoir un regard critique sur les indicateurs testés et notamment d'une année sur l'autre. Elles sont placées sur le rang pour permettre le travail de l'inter-rang. Deux sondes par modalité sont installées. Une à 30 cm de profondeur, sensible aux précipitations, à la sécheresse et à la structure de l'horizon de surface et donc aux différentes modalités de compostage. La deuxième est placée à 60 cm de profondeur ce qui nous donne un renseignement de l'impact des conditions météorologiques sur la réserve hydrique du sol. Au delà de 239 cb de pression, les sondes affichent « dry » c'est-à-dire que l'appareil considère le sol comme étant sec. L'appareil Watermark dispose aussi d'un capteur de température du sol (placé à 30 cm de profondeur) permettant une correction en direct des mesures de tension enregistrées et un capteur de température dont les mesures sont également enregistrées toutes les 4 heures (pas de temps convenable proposé par Agroressources qui permet de ne manquer aucune information tout en évitant de saturer la mémoire de l'appareil).

Les litterbags sont mis en place sur le réseau parcellaire comme indiqué sur la fiche protocole établi (cf annexe 7). Afin de tester la réaction de cet indicateur nous avons mis en place un essai sur le Cabinet d'Agronomie Provençale avec différentes modalités : foin broyé (pour mimer l'action de la faune supérieure en taille à la maille du sachet) ou non, profondeur d'enfouissement à 10 cm (profondeur classique), à 20 cm ou en surface, placette arrosée ou non, maille du sachet de 600µm ou 100µm. Quelques sachets sont placés en sous-bois (où la biodiversité des sols est supposée très importante). De plus une série de sachets prélevés toutes les semaines a été mise en place pour suivre de façon quasi continue la cinétique de décomposition de la matière organique. Pour la placette arrosée, nous nous sommes basés sur une pluviométrie printanière (avril/mai) d'une région pluvieuse (Vosges) soit 80 mm par mois (données Météo-France 2015). Ainsi deux arrosages de 10 L/m² ont été effectués par semaine.

Pour réaliser le slake test, il est nécessaire de prélever des mottes (agrégats d'une centaine de grammes environ) de terre. Par modalité ou parcelle soumise au test, nous prélevons 6 mottes sur l'ensemble de la parcelle ou de la placette que nous allons soumettre au test de façon à pouvoir traiter statistiquement les données (calcul de la moyenne et de l'écart-type). Les mottes choisies sont celles formées par un travail du sol réalisé par le vigneron ou si ça n'est pas le cas, elles sont créées en piochant au milieu de l'inter-rang.

La mesure consiste à placer la motte sur une grille qui est immergée dans de l'eau claire (eau du robinet) jusqu'à ce que celle-ci tombe entièrement au fond du bocal. Le temps nécessaire à dissoudre entièrement la motte de terre est noté et permet de déterminer une classe de sol. Par exemple, une motte qui met entre 7 et 8 minutes à se désagréger sera de classe 8. Le test est arrêté à 10 minutes. Toutes les mottes résistant à l'action de l'eau au-delà de 10 minutes se voient attribuées la classe 11. Ce temps de 10 minutes a été choisi car il permet de différencier les modalités testées (cf partie III.5) et reste relativement court. C'est principalement pour ce test, rapide à mettre en place, que nous avons étendu le réseau d'étude à une dizaine de parcelles dont des sols de forêt. Ces sols seront ajoutés aux sols ayant comme modalité « BRF » pour bois raméal fragmenté (mise en place d'une litière fraîche en surface du sol). Pour la dose par an, nous consultons la bibliographie. La quantité de matière végétale aérienne (représentant plus de 95% des apports de litière forestière) est donnée par l'étude de Lagacé Banville, J. (2009) qui estime, grâce à des trappes placées au sol, pendant un an, dans différents types de forêt tempérées (Canada) que :

- Une forêt de feuillue restitue 297.9 g.m^{-2} par an soit environ 3t/ha
- Une forêt de conifère à canopée ouverte restitue 159.6 g.m^{-2} par an soit environ 1.6t/ha

Pour compléter le slake test et voir ce qui influence la classe des sols testés une motte est envoyée au laboratoire Teyssier, basé dans la Drôme, pour analyse de pH, texture, taux de matière organique et rapport C/N. En effet, nous considérons que ces paramètres influencent beaucoup la stabilité d'un sol. Comme cela a été dit dans la première partie, la matière organique et les argiles permettent la formation des complexes argilo-humiques. Le rapport C/N permet quant à lui d'évaluer la qualité de la matière organique et d'estimer les processus de minéralisation et d'humification se déroulant dans les sols (Lafond et al., 1992). Akselsson et al. (2005) ont décrit le rapport C/N comme un bon indicateur pour évaluer la séquestration du carbone dans les sols. En effet, un rapport C/N fort représente un faible taux de décomposition du carbone puisque les organismes décomposeurs utilisent l'azote qui devient rapidement limitant. Un rapport C/N faible indique une concentration élevée en azote et un fort degré de décomposition. La texture est considérée par Salome, C. et al. (2014) comme un paramètre inhérent du sol ayant un fort impact sur les paramètres dynamiques.

Dans un souci de simplicité de la méthode, nous préférons analyser les chiffres ou données obtenues par comparaison plutôt que d'établir ou d'essayer de se référencer à une lourde base de données en termes de qualités inhérentes du sol, climat, topologie, etc. Cependant, il sera possible, en parallèle de nos bio-indicateurs de mesurer des qualités inhérentes du sol afin d'avoir une idée globale des valeurs obtenues dans leur contexte pédo-climatique et commencer à accumuler des données régionales. Les bio-indicateurs seront donc testés sur la parcelle cible ainsi que sur une ou des parcelles voisines, avec les mêmes caractéristiques hormis le mode de conduite qui nous sera renseigné par l'agriculteur, ainsi que sur le sol de forêt adjacent à la parcelle cible.

III – Résultats et discussion

Nous allons étudier les résultats des indicateurs testés un à un avant d'essayer de les confronter de façon statistique.

III.1 Le test bêche

Ce test n'a pu être réalisé que sur les sites expérimentaux du Vallon des Borrels et de la Celle étant donné la faible pluviométrie en région PACA de l'année 2016. En effet, ce test nécessite un sol

humide pour pouvoir en prélever un bloc à la bêche. Cependant sur les sites où il a été pratiqué, ce test a offert un visuel direct du sol grâce au microlithe prélevé. Il permet notamment de noter certaines différences évidentes comme la présence ou l'absence de galeries ou la différence de couleur. Néanmoins, ce test reste subjectif au niveau de l'appréciation et doit être pratiqué par complémentarité avec d'autres tests quantitatifs. Nous pensons notamment au slake test (voir partie III.5) pour avoir un renseignement complet sur la stabilité structurale. Ce dernier renseigne sur la stabilité des agrégats entre eux alors que le test bêche offre un renseignement sur le type d'agrégat.

III.2 La biomasse microbienne

Confère annexe 13 pour avoir un exemple de rendu d'une analyse Diamant Elite et AT2 réalisées par le laboratoire Celesta-lab.

Propriété	Agriculture	Modalité	MO%	C (g/kg terre)	BM (mgC/kg terre)	BM (%C)
Valabre	Biologique depuis 2005 (en conversion depuis 2003)	Témoin Travaillé	1.9	11.1	284	2.6
		Témoin Enherbé	2.7	15.6	523	3.4
		Matière végétale non compostée (5-10cm épaisseur) Travaillé	2.0	11.6	264	2.3
		Matière végétale non compostée (5-10cm épaisseur) Enherbé	1.8	10.4	252	2.4
		Compost végétal 10T/ha Travaillé	1.9	10.9	260	2.4
		Compost végétal 10T/ha Enherbé	2.8	16.2	473	2.9
Beaupré	Biologique depuis 2013 (en conversion depuis 2010)	Témoin	1.3	7.6	151	2.0
		Compost fermier enrichi 3T/ha	1.5	8.9	185	2.1
		Bochevo 1T/ha	1.5	8.6	180	2.1
Vallon des Borrels	Biodynamique depuis 1989 (Pumant)	Compost fermier enrichi 4T/ha Travaillé	1.2	7.0	123	1.8
	Biodynamique depuis 2016 (Condroyer)	Compost fermier enrichi 4T/ha Travaillé	1.0	5.8	107	1.8
	Conventionnelle raisonnée (Janin)	Engrais à base de lisier de porc Travaillé	1.2	6.7	128	1.9
	Conventionnelle (Le Puit)	Fertilisation minérale Travaillé	0.9	5.0	66	1.3

Tableau 1 : Tableau récapitulatif des données mesurées par le laboratoire Celesta-lab

Pour les trois sites d'expérimentations testés, aucune différence entre les modalités est observée. Ceci n'est pas surprenant quant aux sites de Valabre et de Beaupré. En effet, l'épandage de la matière a eu lieu seulement trois mois auparavant. Ce temps de latence et les quantités épandues n'ont pas permis de modifier les paramètres du sol : pourcentage de matière organique (MO) (ceci est d'ailleurs montré par l'analyse), structure, éléments minéraux disponibles, etc. Ainsi, même si l'indicateur biomasse microbienne (BM) réagit rapidement (de l'ordre de la semaine), il n'est pas discriminant ici. Cependant, il semble plus surprenant que sur le site des Borrels cet indicateur ne discrimine pas les modalités. En effet, même les taux de matière organique sont comparables pour les quatre modalités dont une recevant du compost végétal enrichi depuis plus de 25 ans (Pumant) et une ne recevant que des intrants minéraux (Le Puit). Cependant, les taux de matière organique sont confirmés par le laboratoire Teyssier. La matière organique est un paramètre certes dynamique du sol mais modifiable à long termes. La parcelle de Condroyer a été acquise seulement cinq ans auparavant. C'est à partir de cette date qu'elle a commencé à recevoir du compost à hauteur de 5 tonnes par hectare, un rang sur deux. Pumant est traitée depuis 25 ans de cette façon. Néanmoins, pour préparer la plantation de celle-ci, sept ans auparavant, elle a été défoncée et nivelée ce qui a dû grandement perturber le sol et enterrer voir déplacer la matière organique. Il semble donc que bien

plus de cinq années d'apport de matières organiques (de composition de base donnée en annexe 12) à raison de cinq tonnes par hectare soient nécessaires à rehausser le taux de matière organique pour ce type de sol sablo-limoneux (confère annexe 11). En effet, sur une parcelle en place depuis 30 ans, ayant subi le traitement décrit précédemment sur toute cette durée, l'analyse de sol nous donne un taux de matière organique de 3.49% semblable à celui de la forêt adjacente de 3.76%.

Les résultats concernant le site de Valabre nous montrent que l'enherbement permet un net apport de MO. Le taux de MO élevé est la conséquence d'un enherbement mis en place il y a 10 ans et maintenu depuis. L'abondance microbienne évolue dans le même sens. En effet, pour les modalités « témoin » et « compost végétal », on observe 1% de différence entre l'inter-rang enherbé et celui travaillé et un facteur 2 pour la BM. Il est par contre étonnant de ne pas retrouver ces chiffres quant à la modalité « matière végétale non compostée » qui n'a en tout cas pas pu modifier le taux de MO en trois mois et surtout pas à la baisse. Des chiffres plus cohérents sont retrouvés dans les analyses du laboratoire Teyssier, 2.71% pour le rang enherbé contre 1.35% pour celui travaillé soit un rapport du simple au double comme pour les autres modalités. Une erreur a pu être commise selon le laboratoire Celesta-lab. Cependant, aucune conclusion ne peut être tirée quant à l'origine de cette augmentation. En effet, elle peut être liée à l'absence de travail du sol comme nous le dit Ranjard, L. (2015) qui éviterait :

- la perturbation des écosystèmes souterrains passant notamment par une simplification qualitative de la micro-chaîne trophique (Villeneuve, C. et al. 2009)
- la destruction des éléments structuraux tels que les glomalines, sensibles à l'oxygène et à l'exposition au soleil, dont nous avons déjà parlé dans la partie I.2, sous partie fonctions écologiques

L'augmentation de BM peut aussi être liée à l'augmentation du taux de matière organique ou une combinaison des deux facteurs.

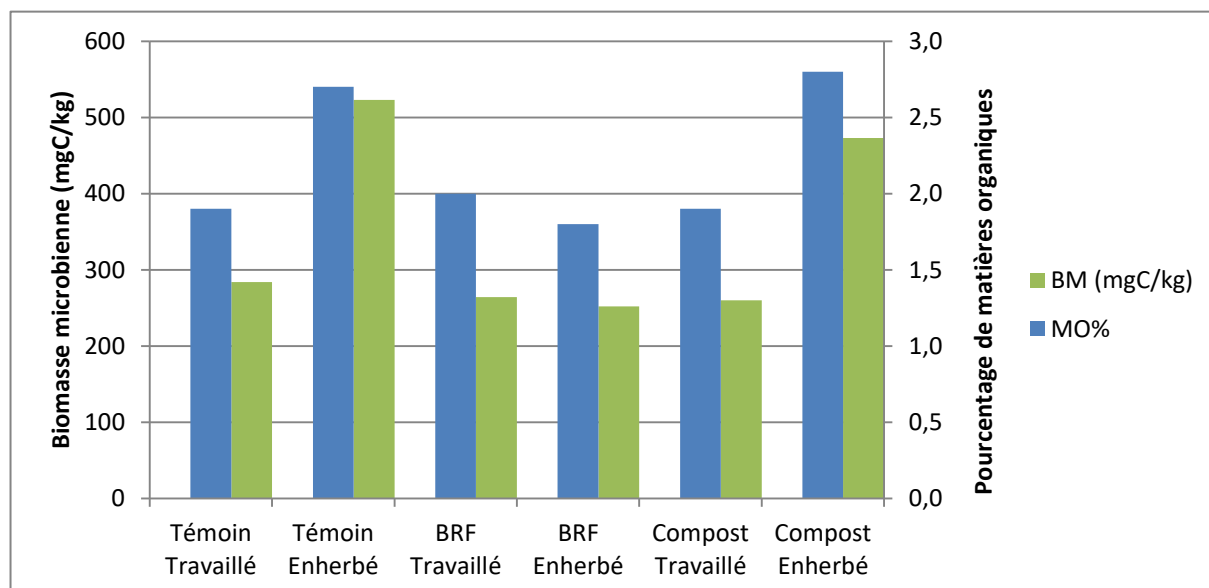


Figure 5 : Essai Valabre – BM et taux de MO en fonction de la modalité testée

A voir dans les années à venir si l'apport de matière sur l'inter-rang travaillé permet d'augmenter la MO du sol et la vie microbienne et cela dans les mêmes proportions que l'inter-rang enherbé. Il sera

aussi possible d'observer cela sur le site de Beaupré où tous les inter-rangs sont travaillés et où les taux de MO sont relativement bas par comparaison au site de Valabre.

Cependant, pour l'heure, nous considérons qu'en dépit de son prix honéroux, cet indicateur ne permet pas de différencier des modalités très différentes.

III.3 La nématofaune

Le laboratoire Elisol a rendu un rapport complet suite aux analyses de sol réalisées. L'annexe 14, montre le tableau qui décrit tous les indices nématofauniques utilisés ici. En annexe 15, est présenté un exemple de rendu d'analyse pour une parcelle. Cette analyse ne comprend pas tous les chiffres mais permet d'établir un bilan complet de la parcelle :

- Les nématodes libres servent à caractériser « le niveau d'activité biologique » de façon globale (en dessous de 3 individus par g de sol sec on considère qu'elle est trop faible) alors que les nématodes phytophages renseignent sur la productivité végétale.
- L'abondance des différents groupes trophiques ainsi que l'abondance des genres majeurs de nématodes phytoparasites est un détail des deux indicateurs généraux cités ci-dessus. Ils permettent, pour le premier de voir de quelles communautés trophiques vient le niveau d'activité, de voir si il y a un équilibre entre les communautés. En effet, on pourrait imaginer un indicateur d'activité biologique de 13 individus par g de sol sec soit, très élevé qui serait uniquement lié à une communauté de nématodes bactériovores très développée. A première vu le sol est en « bonne santé » alors qu'en fait, il n'y a pas d'équilibre entre les communautés et celle dominante traduit un sol présentant une minéralisation extrêmement importante des constituants de celui-ci et donc un sol déséquilibré. Le deuxième est un indicateur des nématodes à risque pour les cultures. Par exemple, en vignes, nous allons surveiller les Longidoridae_Xiphinema, vecteurs du court-noué. Au-delà d'un certain seuil ils peuvent être dommageables pour la parcelle. Ce seuil n'est jamais atteint sur nos parcelles.
- L'indice des voies de décomposition de la matière organique permet de savoir si la décomposition est le fait majoritaire des bactéries ou plutôt des champignons. En cas de déséquilibre, la matière sera soit trop minéralisée soit trop humifiée (manque d'éléments minéraux, de nutriments entraînant la formation de tourbe). On peut considérer qu'en dehors de l'intervalle 35-85 les voies de décomposition de la matière organique sont déséquilibrées.
- Le diagnostic du réseau trophique du sol place l'indice d'enrichissement et de structure sur un même graphique dont nous avons parlé dans la partie I.3.

Ensuite, les abondances par groupe trophique, les six indices mentionnés dans la partie I.3 (SI, EI, IVD, PPI, MI et indice de Shannon), les empreintes métaboliques (d'enrichissement, de structure de phytophages, de bactériovores, de fongivores et totales) sont donnés en annexe 16 sous forme de tableaux et d'histogrammes.

Sur le site de Beaupré, les apports de compost ne semblent pas avoir créé de différences en termes de populations nématofauniques. Au contraire, en regardant les données brutes de l'annexe 16, c'est-à-dire le tableau de l'abondance des différents types de nématodes (tableau 1) il apparaît même que c'est la modalité témoin qui a les chiffres les plus élevés. Cependant, lorsque l'on regarde les indices nématofauniques (tableau 2), ils sont semblables voir supérieurs (il est possible de

considérer qu'il y a une différence entre deux modalités à partir du moment où elle est doublement supérieure ou presque) pour l'indice de structure pour les modalités avec apport (bochevo et compost enrichi). Il semblerait donc que les deux apports permettent de stabiliser la structure du sol en favorisant les communautés omnivores et carnivores principalement. C'est dans ce cas concret qu'il est important de considérer toutes les données une à une et ne pas tirer de conclusions hâtives. En effet, lorsque l'on regarde l'abondance des différents groupes trophiques pour les trois modalités nous pouvons constater qu'en réalité les communautés omnivores et carnivores sont identiques mais que dans la modalité témoin, les bactérivores sont supérieures et cela du simple au triple. Ainsi, en proportion, les omnivores et les carnivores sont plus importants dans les deux autres modalités ce qui donne un indice de structure artificiellement plus élevé.

Les résultats concernant le site de Valabre sont plus que surprenant notamment lorsque l'on regarde les abondances des nématodes phytophages et phytoparasites entre les modalités enherbées et non enherbées. Après une entrevue avec Cécile Villenave à son laboratoire il a été conclu qu'au moment du traitement des échantillons ces modalités ont été interverties. En prenant cela en compte, des résultats similaires à ceux du laboratoire Celesta-lab sont retrouvés. A savoir, l'enherbement permanent entretenu sur un grand nombre d'années (dix dans notre cas) favorise l'activité biologique. En effet, entre les modalités enherbées et non enherbées, nous avons, concernant l'abondance des différents types de nématodes, des rapports variant entre plus de 3 (communauté omnivore pour la modalité T1) à 13 (communauté phytoparasite pour la modalité T2 tout en ayant 0 *Xiphinema*) en passant par des rapports de 6-7 pour des communautés révélatrices de stabilité (communauté omnivore-carnivore pour la modalité T1). Cela dans un parfait équilibre des communautés. Cependant, entre les modalités T0, T1 et T2 nous ne constatons pas de différences. Bien que certains indicateurs nématofauniques comme les communautés bactérivores et fongivores puissent varier assez rapidement (à l'échelle du mois) aucune différence ne se fait remarquer.

Sur le site du Vallon des Borrels, les parcelles sont comparées deux à deux. Le Puit et Condroyer d'une part, Janin et Pumant d'autre part.

La parcelle Le Puit est l'exemple type de « la mauvaise parcelle ». Attention lorsqu'un tel jugement de valeur est émis, il faut comprendre que seule une activité biologique du sol développée et diversifiée est en cause. L'agriculteur exploitant cette parcelle en est très satisfait puisqu'il atteint les 55 hL/ha autorisés par l'appellation « Coteaux d'Aix en Provence » avec une qualité qu'il juge bonne. Il fait quand même part de problèmes d'érosion d'ailleurs largement constatés après un orage. Pour ce qui est de « la mauvaise parcelle », les chiffres montrent qu'elle est complètement déséquilibrée. En effet, la quantité de nématodes libres de 776 pour 100 g de sol sec qui reflèterait une activité biologique tout à fait correcte est en fait uniquement liée à la communauté bactérivore. Ceci est d'ailleurs confirmé par l'IVD de 0.9. Le graphique de l'indice d'enrichissement en fonction de l'indice de structure place d'ailleurs ce sol dans la case des sols perturbés, enrichi en azote avec un rapport C/N faible. La décomposition est quasiment exclusivement bactérienne. Ceci explique d'ailleurs le taux de matière organique anormalement faible donné par le laboratoire Celesta-lab (0.86%). La parcelle Condroyer est classée sur le graphique $EI=f(SI)$ dans la case sol mature enrichi en azote, C/N faible. Son activité biologique reste relativement faible avec un indice de nématodes libres de 341 individus pour 100 g de sol sec néanmoins les communautés sont très équilibrées. Ceci conduit à une structure importante du sol. A noter que le rapport entre l'indice de structure de ces deux parcelles est de 5. Les deux parcelles étant accolées, l'étude nématofaunique permet de conclure que le mode

de conduite de Condroyer favorise la vie du sol au sens large du terme par rapport au mode de conduite de la parcelle Le Puit. Ceci est d'ailleurs d'autant plus flagrant si l'on regarde les empreintes métaboliques. A présent, ce n'est plus la seule abondance des nématodes qui sera prise en compte mais leur poids (qui est estimée mathématiquement en fonction de leur taille microscopique) et donc leur importance écologique. En effet, on estime que plus un individu est gros plus il va peser lourd dans la balance écologique (respiration liée à la taille, source de carbone liée à la taille notamment). La parcelle de Le Puit présente une empreinte métabolique d'enrichissement de 1102 $\mu\text{gC/g}$ de sol sec liée à l'empreinte métabolique des bactérivores. L'empreinte métabolique de structure est de 1 $\mu\text{gC/g}$ de sol sec ce qui révèle bien l'aspect complètement instable de ce sol. Pour comparaison le rapport de ces deux parcelles concernant l'empreinte métabolique de structure est de 100.

Concernant les deux autres parcelles des Borrels, la même tendance est observée mais de façon moins extrême. C'est-à-dire que la parcelle Janin, conduite de façon conventionnelle est un peu moins déséquilibrée que Le Puit. Cependant, le graphique $\text{EI}=\text{f}(\text{SI})$ classe toujours ce sol comme perturbé. L'IVD entre les parcelles Janin et Pumant est semblable, respectivement 0.6 et 0.4 ce qui signifie que sur la parcelle Pumant la décomposition est majoritairement fongique alors qu'elle est majoritairement bactérienne pour la parcelle Janin. Il persiste un rapport entre l'indice de structure des deux parcelles de 3 et un rapport entre l'empreinte métabolique de structure des deux parcelles de 6 en faveur de Pumant. Ici aussi, le mode de conduite du domaine Les Fouques est plus favorable à la vie du sol que le mode de conduite de la parcelle voisine.

En conclusion, cet indicateur permet de différencier les modalités de l'étude qui présentent des modes de conduite différents lorsqu'ils sont établis depuis plusieurs années. Cela de façon précise et scientifique. Cependant, il est important de noter que les analyses sont chères (annexe 13) d'autant que si un traitement statistique des données est souhaité, il est nécessaire de faire un certain nombre de répétitions par modalité. Etant donné le coût d'une répétition la robustesse du prélèvement a été jugé suffisante pour avoir un résultat fiable. De plus, les résultats sont disponibles après un délai important (échantillons envoyés au 02 juin pour des résultats le 26 août) et surtout la vulgarisation est plus que complexe. En effet, beaucoup de chiffres sont présentés et il semble difficile d'y voir clair sans se pencher réellement sur la question, bibliographiquement et mathématiquement parlant. En effet, pour comprendre il est indispensable de regarder à quoi correspond chaque communauté et surtout comment sont calculés les indices. Il est alors légitime de se demander si présenter cela à un agriculteur peut avoir un réel effet en dehors des nématodes phytoparasites.

III.4 Le litterbag

Pour l'interprétation des résultats, après avoir récolté les données, les courbes représentant, pour chaque modalité, la cinétique de décomposition de la matière organique ont été tracé sur un graphique : poids de la matière organique dans le litterbag en fonction du nombre de jours sous terre (confère figure 6). Les courbes obtenues sont de type exponentiel inversé. Ainsi, pour faciliter la comparaison des données, la courbe de tendance est tracé afin d'obtenir le coefficient de l'exponentielle. En effet, l'équation de la courbe est de la forme : $y = a\exp(-bx)$. Le coefficient de l'exponentielle est b , strictement positif (confère figure 7). Plus il est élevé et plus la cinétique de décomposition de la matière est importante. Le coefficient de détermination R^2 permet de s'assurer de la concordance entre les valeurs expérimentales et la courbe de tendance. Ce coefficient est

compris entre 0 et 1. Plus il est proche de 1, plus la concordance est importante. L'annexe 17 présente l'ensemble des résultats obtenus (tableaux de données, graphiques et courbes de tendance).

Dans la plupart des cas, l'indicateur ne permet pas de différencier les modalités. En effet, si l'on considère les moyennes et écart-types sur les sites expérimentaux de Beaupré et Valabre, les résultats se recoupent. Ceci ne paraît pas étonnant étant donné la mise en place très récente des

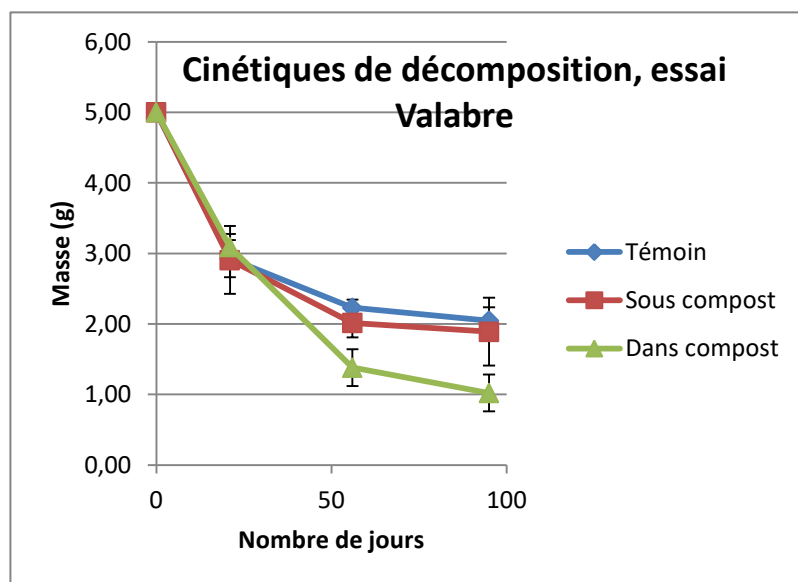


Figure 6 : graphique représentant la cinétique de décomposition de la matière organique en fonction du nombre de jours dans le sol sur le site expérimental de Valabre

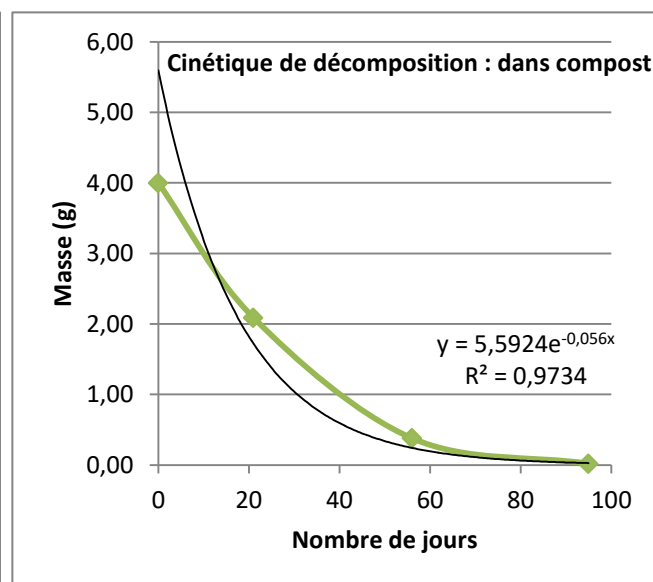


Figure 7 : Cinétique de décomposition de la matière organique en fonction du nombre de jours dans le sol avec la courbe de tendance pour la modalité "dans compost"

essais. Cependant, lorsque l'on regarde le coefficient des courbes de tendances, une modalité semble se distinguer. Sur le site expérimental de Valabre, le coefficient de la courbe exponentielle correspondant à la modalité « BRF » (matière végétale fraîche épandue sur une hauteur de 5 à 10 cm) est près de deux fois supérieur aux autres coefficients avec un coefficient de détermination proche de 1 (0,9913). Ceci signifie que la cinétique de décomposition a une tendance plus rapide que celle des trois autres modalités.

De plus, la faible distinction entre les modalités peut s'expliquer par les conditions climatiques très sèches (confère partie II.1).

Cependant si l'on considère des modalités très différentes l'indicateur se montre discriminant. Prenons l'exemple de l'essai sur le compost comprenant trois modalités : « témoin » (litterbag dans le sol à côté du tas de compost), « sous compost » (litterbag dans le sol sous le compost) et « dans compost » (litterbag directement dans le tas de compost végétal). Cet essai a été mis en place sur le site expérimental de Valabre au niveau des restes de compost épandus à la mi-mars. Il est possible de remarquer qu'après 50 et 100 jours passés dans le sol, la matière organique a été plus décomposée pour le litterbag dans le compost que pour les autres modalités ce qui signifierait que l'activité biologique y est plus importante. Ceci est confirmé lorsque l'on considère le coefficient de l'exponentielle qui est trois à quatre fois supérieur aux deux autres modalités avec un bon coefficient de détermination (0,9734). Seulement 20 jours après, les modalités ne se distinguent pas.

Au Vallon des Borrels, dès 50 jours sous terre une différence significative se fait en faveur des parcelles du domaine Les Fouques, sur lesquelles a été ajouté du compost depuis 5 à 7 ans, contre les parcelles voisines, traitées avec des fertilisants minéraux ou organo-minéraux. Entre les parcelles Janin et Pumant le coefficient de l'exponentielle présente un rapport 1.6 (0.015 contre 0.024). Entre les parcelles Le Puit et Condroyer, il est de 1.3 (0.013 contre 0.017). Ces différences, bien que significatives, restent faibles ce qui peut être mis sur le compte de la sécheresse de la période d'essai. Il est possible de penser que si ces expériences étaient réalisées en période humide (de mars à mai par exemple ou de septembre à novembre) les différences seraient exacerbées. La sécheresse limitant l'activité biologique de façon naturelle, il est difficile de mettre en évidence des différences d'état de développement biologique qui est mesuré par cette activité des organismes. En effet, si l'on regarde les résultats de l'essai conduit sur la ferme Saint Georges, où est installé le Cabinet d'Agronomie Provençale, il est possible de constater que l'essai arrosé a une cinétique de décomposition significativement plus importante que le témoin, non arrosé. Ici aussi la différence se fait sentir après 50 jours sous terre. Entre les deux coefficients de l'exponentielle le rapport est de 1.7. Ainsi, par exemple, nous pourrions nous attendre à avoir un rapport de coefficients entre les parcelles Janin et Pumant de $1.6 \times 1.7 = 2.7$.

Ainsi, pour conclure vis-à-vis de la pertinence de l'utilisation du bio-indicateur litterbag, il est peu coûteux et assez visuel (confère figure 6) et donc facilement compréhensible. Cependant, il semble ne pouvoir distinguer que des modalités très différentes. Ceci est à confirmer après plusieurs années d'essai sur les sites expérimentaux de Valabre et Beaupré et à tester sur des périodes plus propices à l'activité biologiques des sols. Cependant, il permettrait de tester de nouvelles pratiques sans grand budget de façon fiable et tout à fait personnel. Si l'on regarde à nouveau l'essai conduit sur la ferme Saint Georges cet indicateur a permis de montrer une différence d'activité biologique entre la litière et la couche superficielle du sol d'une part et entre un sol de forêt et un sol de prairie d'autre part. En effet, les chiffres que l'on retrouve en annexe 17 de ce rapport montrent que dans la litière, l'activité biologique est deux fois moins importante que dans la couche superficielle du sol et qu'elle est légèrement plus importante en sol forestier que dans un sol de prairie en plein été. Cela de façon significative.

Cependant, l'outil est assez lourd à mettre en place : fabriquer les litterbags, les enterrer, les récupérer puis les traiter est très chronophage et ne permet pas une interprétation immédiate. En effet, il faudra expliquer à l'agriculteur que les résultats seront visibles seulement trois mois après le début de l'expérimentation. De plus, se pose le problème de l'installation du dispositif sur des parcelles dont l'enherbement est entièrement traité mécaniquement. C'était le cas sur le site expérimental de Beaupré où les litterbags ont été repérés par une signalisation visible afin que les tractoristes ne griffent pas la zone. Ceci est difficile à mettre en place partout et peut entraîner un léger biais. L'aspect chronophage de l'expérimentation limite donc le nombre de répétitions ce qui rend toute interprétation statistique difficile alors qu'un grand nombre de répétitions serait souhaitable notamment pour pallier un léger biais causé par la pesée des échantillons. En effet, malgré la maille fine des litterbags, de la terre ou des racines s'incrustent à l'intérieur des sachets et cela de façon hétérogène. Malgré le tamisage des échantillons et le tri de la matière organique, une certaine imprécision demeure.

III.5 Le Slake test

Comme décrit dans la partie II.5, le slake test a été réalisé sur 17 parcelles pour 28 modalités, certaines parcelles comprenant plusieurs modalités comme c'est le cas sur les sites expérimentaux de Beaupré et Valabre. Suite à quoi la médiane et l'écart-type des classes obtenues pour les six répétitions de chaque modalité ont été calculés. Le tableau de résultats en annexe 18 montre que cet indicateur permet de différencier, la plupart du temps, les modalités testées qui se situent dans un environnement proche. Prenons tout d'abord les sites expérimentaux suivis tout au long de l'étude.

Sur le site expérimental de Beaupré, la modalité compost semble se différencier significativement avec une médiane de 5 contre 1.5 pour les deux autres (témoin et organo-minérale). Néanmoins, ces médianes sont relativement faibles par comparaison avec d'autres parcelles comme Valabre. Ce sujet sera rediscuté par la suite.

Au Vallon des Borrels les parcelles Pumant, que l'on teste l'inter-rang enherbé ou travaillé, et sa voisine Janin sont facilement différenciables. Cela en faveur de la parcelle Pumant. Pour le couple Condroyer/Le Puit, le test répond en faveur de Condroyer, inter-rang enherbé. Pour l'inter-rang travaillé, le Slake test donne une médiane de 7 contre 3 pour la parcelle Le Puit mais l'écart-type important ne permet pas de différencier ces deux modalités. Il est d'ailleurs possible de remarquer, au regard de tous nos résultats, que l'écart-type des données est beaucoup plus élevé pour une modalité travaillée qu'une modalité enherbée et donc que la variabilité de stabilité d'une motte de terre est beaucoup plus importante. C'est le cas pour la parcelle Pumant qui présente une médiane égale mais un écart-type de 0 pour l'inter-rang enherbé contre 2,58 pour celui travaillé ou pour la parcelle de Valérie Pourchier à la Celle ou encore pour la modalité témoin de Valabre.

Sur le site expérimental de Valabre, seule la modalité témoin, inter-rang travaillé semble avoir une médiane plus faible que pour les autres modalités. On ne différencie pas les valeurs mais cela peut être lié à un défaut du système de notation de notre méthode. En effet, par soucis de rapidité, le test est arrêté après 10 minutes. Tout échantillon dépassant ce temps se voit attribuer la classe 11. Sur le site de Valabre, c'est le cas pour toutes les modalités sauf l'inter-rang travaillé de la modalité témoin. Il est tout de même possible de conclure que le sol de la parcelle de Valabre est dans l'ensemble très stable. Cela peut être en partie expliqué par le fort taux de matière organique. En effet, le sol de Beaupré et Valabre sont comparables en termes de paramètres inhérents mais la parcelle de Valabre a des taux de matière organique plus élevés que celle de Beaupré. Ça n'est pas le cas pour la modalité T1 inter-rang travaillé mais il est possible de mettre en cause une inhérogénéité ponctuelle de la parcelle. En effet, pour les échantillons envoyés au laboratoire Teyssier, la méthode de prélèvement n'était pas robuste. Une seule motte était envoyée.

Pour ce test le réseau de parcelles testées a été étendu. Ceci permet notamment de montrer qu'un sol de forêt, qui est autogéré, est très stable avec une médiane de 11 et un écart-type de 0 pour les deux forêts testées. L'une se situe dans le Vallon des Borrels et a des résultats similaires à la modalité inter-rang enherbée de la parcelle Pumant avec un taux de matière organique largement supérieur de 3.75% contre 1.25%. Peut-être que si le test était étendu sur plusieurs heures il serait possible de différencier ces modalités. L'autre se situe sur les sols acides du côté de Plan-de-la-Tour qui ont des taux de matière organique relativement faibles étant donné leur fort pourcentage de sables dans la texture du sol à hauteur de 70%. Néanmoins, malgré cela la forêt juxtaposée aux parcelles testées est très stable alors que les parcelles agricoles ne le sont pas du tout avec une médiane de 5 et un

écart-type de 1.33 au mieux. Ces parcelles sont conduites traditionnellement, travaillées tous les rangs, fertilisées soit par des produits organo-minéraux, soit du fumier équin depuis 10 ans soit avec du compost mais seulement depuis 2016.

Une analyse en composantes principales (ACP) focalisée sur la médiane du slake test (Moyenne_ST) permet de voir quels paramètres du sol l'influencent (confère figure 8 et confère annexe 19 pour les scripts R permettant d'obtenir ces résultats statistiques : les # représentent la description de ce que l'on souhaite obtenir via la commande R qui suit)

Les variables se trouvant dans le cercle rouge sont significativement liées à la variable slake test, celles se trouvant sur le cercle extérieur en sont indépendantes. En vert, les variables sont positivement corrélées (elles évoluent dans le même sens) au slake test et en rouge, négativement. Ce graphique nous permet de confirmer que les résultats du slake test sont positivement et significativement corrélés aux taux de matière organique (MO sur la figure 8) des parcelles testées. Pour les autres variables, les corrélations ne sont pas significatives ici. Peut-être que cette variable est liée à d'autres mais les mesures ont été réalisées sur un réseau de parcelles assez restreint ce qui peut limiter la pertinence des résultats de l'ACP. Les corrélations seraient alors :

- Positives entre le Slake test et l'enherbement et sa durée (D), le rapport C/N, le taux de limons (L), le pH
- Négatives entre le Slake test et les taux de sables (S) et d'argiles (A) et l'écart-type (ET_ST)

La figure 9 présente la carte des facteurs de l'ACP non focalisée sur la variable Slake test. 66.2% de l'information est présente sur ce graphique (somme des pourcentages des deux axes). Cela signifie que 33.8% ne sont pas représentés. On parle d'inertie perdue. Pour pallier à cela il serait possible de considérer un troisième axe. Cependant, ce graphique sera suffisant ici. L'échelle de couleur

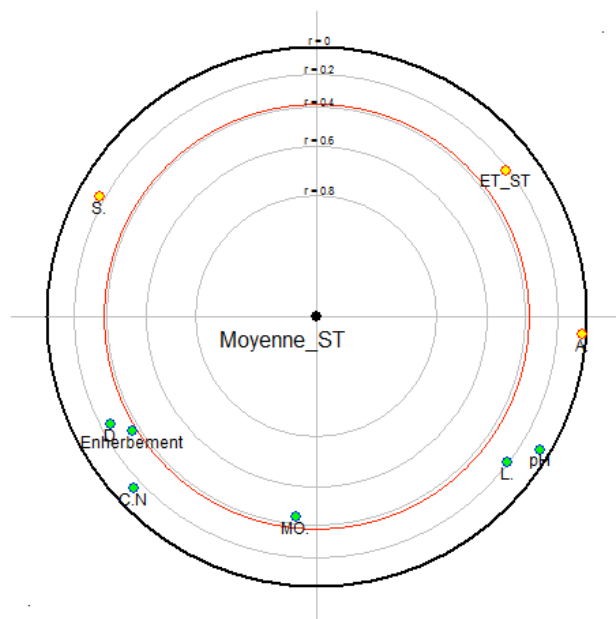


Figure 8 : Cercle de corrélation des variables centré sur la variable médiane du Slake test

représente la contribution des variables à la construction des axes. Plus le vecteur représentant la variable se rapproche du cercle et plus sa représentation sur les deux axes retenus est fiable. Par exemple, la représentation de la variable taux d'argiles n'est pas de bonne qualité dans ce repère. Il vaudrait mieux, pour pouvoir l'interpréter, considérer un autre repère. Deux vecteurs parallèles signifie que les deux variables adjointes sont liées positivement alors que deux vecteurs opposés signifie que les variables sont liées négativement. Deux vecteurs perpendiculaires signifie que les variables sont indépendantes. Ainsi, la figure 9 confirme que les variables Slake test

et taux de MO sont positivement corrélées. Les variables enherbement, rapport C/N et durée d'enherbement le sont entre elles aussi. Les deux groupes de variables cités précédemment semblent être positivement corrélé aussi mais de façon moins significative. Les taux de limons et le pH sont positivement corrélés entre eux et négativement corrélés avec le taux de sables ce qui paraît cohérent. Les dernières variables citées semblent indépendantes des premières variables citées.

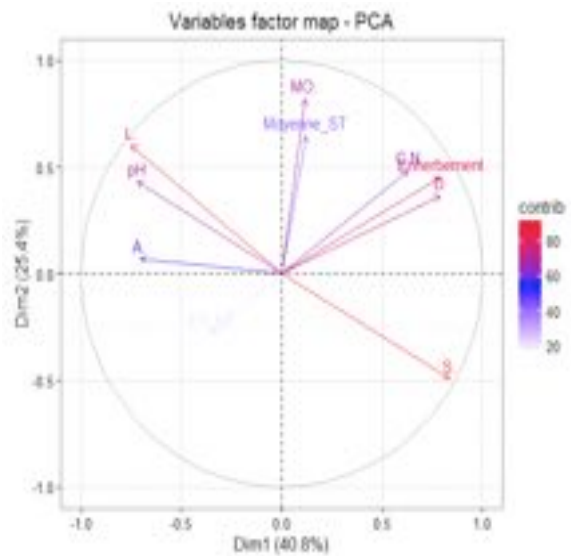


Figure 9 : Représentation des variables projetées sous R

III.6 Confrontation des différents indicateurs

Les données du slake test sont maintenant limitées aux sites pilotes pour les confronter aux données des indicateurs : litterbags (LB), biomasse microbienne (BM), et les indices nématofauniques qui ont beaucoup été cité afin de différencier les modalités dans la partie III.3. A savoir : les nématodes libres (NL), l'indice d'enrichissement (EI), l'indice de structure (SI), l'empreinte d'enrichissement (EFOOT) et l'empreinte de structure (SFOOT). L'annexe 20 présente le tableau de données et l'annexe 19 le script R de l'ACP.

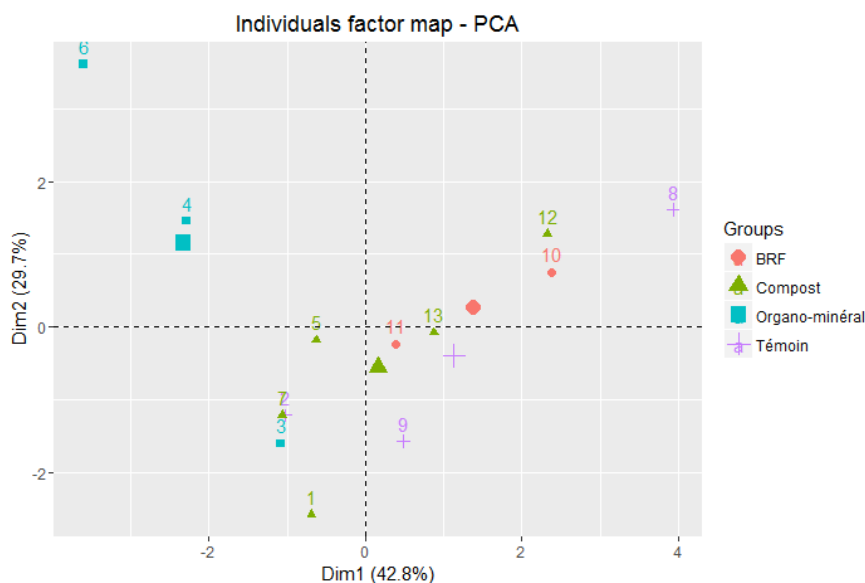


Figure 10 : Carte des individus projetés sous R - ACP

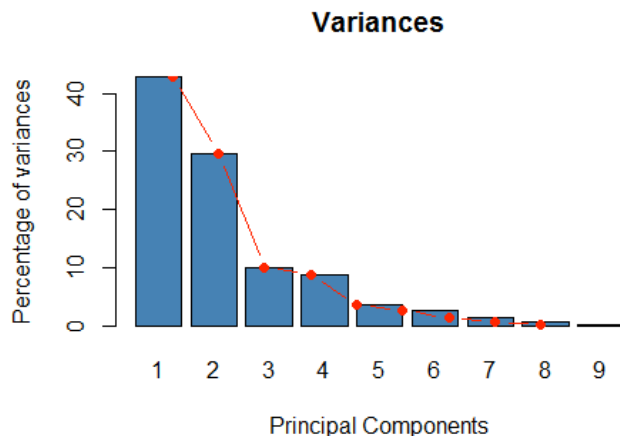


Figure 11 : Histogramme des valeurs propres en fonction de composantes - ACP

```
> res.pca$var$coord
```

	Dim.1	Dim.2
Moyenne_ST	0.7561666	0.07929594
ET_ST	-0.2951330	-0.60805725
LB	0.7820217	0.17213534
BM	0.9006928	0.15193257
NL	0.5632574	0.69763750
SI	0.5175702	-0.74787526
EI	-0.5023220	0.70637625
EFOOT	-0.4462191	0.80487069
SFOOT	0.8573713	0.23003878

Figure 12 : Coordonnées des variables dans les deux premières dimensions - ACP

Pour construire la figure 10, la méthode du coude est utilisée. On coupe l'éboullis des valeurs propres où la droite présente un coude : entre la deuxième et la troisième composante sur la figure 11. Ainsi, les nuages des individus et des variables sont représentés sur les composantes 1 et 2 uniquement qui comprennent la majorité de l'inertie du test (72.5%). La figure 10 représente le nuage des individus. Il est nécessaire de

regarder les coordonnées des variables

dans les dimensions 1 et 2 afin de

comprendre ce que représente les axes (figure 12). Les variables LB, BM, NL, SI, SFOOT et Moyenne_ST présentent des coordonnées dans la dimension 1 fortement positives. Ils sont les indicateurs d'une activité biologique et une stabilité biologique et physique du sol importante. Ainsi, plus une parcelle sera placée dans la partie droite du graphique plus elle sera stable et active biologiquement. A l'inverse, plus une parcelle sera à droite du graphique plus elle sera pauvre biologiquement et peu stable. En effet, les indicateurs EI, EFOOT et ET_ST présentent des

coordonnées négatives dans la dimension 1. Il a effectivement été constaté dans la partie III.3 que le caractère d'enrichissement décrivait des parcelles pauvres biologiquement. Il est nécessaire qu'il y ait un équilibre entre l'indice de structure et l'indice d'enrichissement mais on constate souvent que lorsque l'EI devient très important c'est au détriment du SI ce qui engendre un déséquilibre du sol. On le retrouve notamment sur la représentation des variables projetées sous R (annexe 21) qui montre que SI et EI sont négativement corrélés. Les coordonnées des variables dans la dimension 2, dont la plupart sont proches de 0 légèrement positives (Moyenne_ST, LB, BM, SFOOT et EI), montrent que plus les parcelles se situent proche de l'axe 2 plus elles présentent des valeurs équilibrées pour les différents indicateurs. Plus elles sont vers le haut du graphique plus elles présentent des valeurs déséquilibrées en faveur d'une minéralisation importante de la matière organique du sol (coordonnées de EI et EFOOT fortement positives dans la dimension 2). A l'inverse, plus elles sont vers le bas du graphique, plus elles présentent des valeurs déséquilibrées en faveur de l'indice de structure (coordonnée de SI fortement négative dans la dimension 2). Chaque couleur et figure désigne une modalité et il y a un gros figuré par modalité qui représente le baricentre des parcelles de la modalité concernée.

Une modalité semble se détacher négativement des autres. La modalité organo-minérale. Si l'on prend le baricentre des parcelles de cette modalité, on constate qu'il est situé dans la partie gauche, supérieure du graphique. Ceci signifie que dans l'ensemble, les parcelles de cette modalité ont une

faible activité biologique et une faible stabilité biologique et structurale. Ces parcelles sont déséquilibrées, elles présentent un indice d'enrichissement ainsi qu'une empreinte d'enrichissement trop importante. Ces parcelles ont donc une décomposition bactérienne majoritaire entraînant une forte minéralisation de la matière organique ne permettant pas la stabilité du sol. Il est tout de même important de regarder ce graphique, ces baricentres avec un esprit critique. En effet, le nombre de parcelles pour réaliser cette ACP est très limité ce qui ne permet pas d'avoir des résultats statistiques robustes. Par exemple, la parcelle de Le Puit (numéro 6 sur le graphique) qui présente une empreinte métabolique anormalement élevée impact fortement la position du baricentre de la modalité organo-minérale. Il serait nécessaire de collecter ces données pour un réseau plus important de parcelles et vérifier ce point. Cependant le prix des analyses et l'absence de financement extérieur n'a pas permis, pour cette année, d'étendre plus la recherche. C'est le cas aussi de la modalité témoin dont le baricentre paraît montrer que les parcelles représentant cette modalité sont très riches biologiquement parlant et de façon équilibrée. En effet, la majorité des parcelles de ce groupe se trouve sur le site expérimental de Valabre qui présente des taux de matière organique très importants notamment grâce à un enherbement permanent depuis 10 ans et donc est un cas particulier de cette étude. Il a été démontré plus tôt dans ce rapport que les indicateurs d'activité biologique développés pour ce cas sont pour l'instant le fait de l'enherbement et non des modalités testées même s'il reste très intéressant de voir que les indicateurs permettent de montrer que l'enherbement favorise l'activité biologique et la stabilité du sol.

Conclusions et perspectives

Une série d'indicateurs de la vie biologique des sols a été testée. Certains sont complexes (la nématofaune) d'autres chers (biomasse microbienne et nématofaune) ou chronophage (litterbags). Cependant, des indicateurs simples (Slake test), visuels (litterbags et Slake test), précis (nématofaune) ont été mis en évidence. Pour étudier le sol, suivre un réseau de parcelles dans le temps, comprendre les impacts d'une pratique agricole ces indicateurs sont surtout complémentaires. Néanmoins, le discours se tourne vers les agriculteurs. Pour les convaincre rapidement et pour les marquer le Slake test a tout particulièrement été séduisant. Trente secondes sont suffisantes. Néanmoins, il est nécessaire de l'utiliser avec recul. L'indicateur semble évoluer dans le même sens que les autres indicateurs testés et différencier les modalités dans un sens qui semble cohérent. Cependant, le réseau d'étude doit être développé et l'indicateur affiné. En effet, on pourrait envisager d'étendre les classes pour pouvoir augmenter la capacité de différenciation du test. Si l'on veut conserver cette durée de test, il est aussi possible d'imaginer créer des indices supplémentaires à l'image de l'indicateur nématofaunique sans rendre ce test aussi complexe. Par exemple, il serait possible de calculer l'indice de turbidité de l'eau après une certaine période d'immersion.

Pour les années à venir, les sites expérimentaux seront traités de la même façon et suivis avec les mêmes indicateurs pour voir leur évolution dans le temps et pouvoir observer la réponse de ceux-ci au changement de pratique en cours. La biomasse microbienne n'ayant pas donné beaucoup de renseignements et étant relativement chère sera abandonnée. Cependant, la communauté lombricienne sera ajoutée au set d'indicateurs testés. Les mesures seront réalisées dans une période plus propice à l'activité biologique.

A l'avenir, nous imaginons combiner les résultats obtenus sur le sol avec des résultats sur la vigne et le vin notamment en pratiquant des analyses foliaires et des microvinifications. Le dernier point est déjà prévu au lycée agricole de Valabre qui possède une cave expérimentale. En effet, la santé du sol est une chose mais la production en termes de rendement et de qualité reste une des priorités.

Une base de données cartographique sous QGIS a commencé à être créée (les annexes 3 et 4 en sont un extrait). Elle géolocalise toutes les parcelles testées ce qui permet d'y retourner facilement grâce aux coordonnées GPS facilement exportables. De plus tous les renseignements sur la parcelle ainsi que les résultats des indicateurs sont notés dans la table d'attributs de la couche. Cette table d'attribut est facilement exportable ce qui permettrait de traiter ensuite les données statistiquement à l'image de la partie III.6. Le but étant ensuite d'élargir le réseau de parcelles permettant d'accumuler des données de façon conséquente et ainsi commencer à créer une base de données pour la région PACA. Base de données qui serait précise (données sur les paramètres inhérents du sol, les paramètres dynamiques et sur les pratiques agricoles) et annuelle. En effet une couche est créée par année viticole. Cependant, la réalisation de ce projet passe nécessairement par des financements extérieurs dont la recherche est en cours (ADEME régionale notamment).

Bibliographie

Agronomy News, 1995. Soil Science Society of America, 7

Akselsson, C., Berg, B., Meentemeyer, V., Westling, O., 2005. Scaling up carbon sequestration rates in organic layers of boreal and temperate forest soils - example Sweden. *Global Ecology and Biogeography*, 14, 77-84

Bally, R., 2013. Préface. Dans : Le sol vivant. *Presses polytechniques et universitaires romandes*

Bastida, F., Zsolnay, A., Hernández, T., García, C., 2008. Past, present and future of soil quality indices: a biological perspective. *Geoderma*, 147, 159–171

Bispo, A., Blanchart, E., Delmas, A.B., Laval, K., 2011. Indicateurs de la qualité des sols. In: Girard, M.C., Walter, C., Rémy, J.C., Berthelin, J., Morel, J.L. (Eds.), *Sols et Environnement*. , 2e édition. Dunod éditions, Paris, 509–527

Blanchart, E. et al. Plaquelette : La vie cachée des sols. Saurel, B., Octobre 2010

Bourguignon, C., 2012. Protéger les sols pour préserver la biodiversité. Vidéo réalisée lors des deuxièmes assises nationales de la biodiversité

Cecillon, L., 2008. Quels indicateurs pour évaluer la qualité de sols forestiers soumis à des contraintes environnementales fortes ?. *Earth Sciences*. Université Joseph-Fourier - Grenoble I, 2008

Coll, P., 2011. Qualité des sols viticoles en Languedoc-Roussillon, effets des pratiques agricoles. *Thèse de l'Ecole Nationale Supérieure Agronomique de Montpellier*, 278 p.

Coll, P., Le Cadre, E., Blanchart, E., Hinsinger, P., Villenave, C., 2011. Organic viticulture and soil quality: a long-term study in Southern France. *Applied Soil Ecology*, 50, 37–44

Coll, P., Le Cadre, E., Villenave, C., 2012. How are nematode communities affected during a conversion from conventional to organic farming in southern French vineyards? *Nematology*, 14, 665–676

Doran, J.W., Parkin, T.B., 1994. Defining and Assessing Soil Quality, SSSA Spec. Publ. No. 35. Soil Sci. Soc. Am., Inc. and Am. Soc. Agron., Inc., Madison, WI

Doran, J.W., Safley, M., 1997. Defining and assessing soil health and sustainable productivity. In: Pankhurst, CE, Doube, B.M., Gupta, V.V.S.R., editors. Biological indicators of soil health. *CAB International*, 1-28

Doran, J. W., Sarrantonio, M., and Liebig, M. A. 1996. Soil health and sustainability. *Advances in Agronomy*, 56, 1-54

Doran, J. W., Zeiss, M. R., 2000. Soil health and sustainability: managing the biotic component of soil quality. *Applied Soil Ecology*, 15, 3-11

European Commission, 2006. Communication from the Commission to the Council, the European Parliament, the European Economic and Social Committee and the Committee of the Regions: Thematic Strategy for Soil Protection; Summary of the impact assessment. SEC(2006)1165, Brussels

Fränzle, O., 2006. Complex bioindication and environmental stress assessment. *Ecol. Indic.*, 6, 114–136

Galus, C., 2008. Il est urgent de sauver les sols. *Le Monde*, édition du 22/06/08

Gras, R., Benoit, M., Deffontaines, J. P., Duru, M., Lafarge, M., Langlet, A., and Osty, P. L., 1989. *Le Fait Technique en Agronomie. Activité Agricole, Concepts et Méthodes d'Etude*. Institut National de la Recherche Agronomique ed. L'Harmattan. Paris, France

Girardin, P., Bockstaller, C., and van der Werf, H. M. G. 1999. Indicators: a tool to evaluate the environmental impacts of farming systems. *Journal of Sustainable Agriculture*, 13, 5-21

Gobat, J.M., Aragno, M., Matthey, W., 2013. La vie en action. Dans : Le sol vivant. *Presses polytechniques et universitaires romandes*, 87-161

Gobat, J.M., Aragno, M., Matthey, W., 2013. Le sol, un système écologique. Dans : Le sol vivant. *Presses polytechniques et universitaires romandes*, 4-10

Gobat, J.M., Aragno, M., Matthey, W., 2013. Les animaux et le sol : une grande variété de formes et de fonctions. Dans : Le sol vivant. *Presses polytechniques et universitaires romandes*, 415-444

Gobat, J.M., Aragno, M., Matthey, W., 2013. Les briques du système sol : constituants inertes et êtres vivants. Dans : Le sol vivant. *Presses polytechniques et universitaires romandes*, 11-50

Gobat, J.M., Aragno, M., Matthey, W., 2013. Les propriétés du sol. Dans : Le sol vivant. *Presses polytechniques et universitaires romandes*, 74-76

Hubert, G., Schaub, C., 2011. La fertilité des sols : L'importance de la matière organique. *Chambre d'agriculture Bas-Rhin*.

Janvier, C., 2007. Recherche d'indicateurs de la sante des sols. *Sciences of the Universe*. INAPG (AgroParisTech)

Lafond, R., Claude, C., Ducruc, J.P., 1992. Pédologie forestière. *Mont-Royal*, 146

Lagacé Banville, J., 2009. Caractéristique des stocks de carbone de 5 types de formations végétales dans un secteur du bassin versant de la rivière eastmain, baie James. *Université du Québec à Montréal*, 52-81

Martinez-Blanco, J., Lazcano, C., Christensen, T., Munoz, P., Rieradevall, J., 2013. Compost benefits for agriculture evaluated by life cycle assessment. *Agronomy for Sustainable Development*, Springer Verlag/EDP Sciences/INRA, 33, 721-732

Ranjard, L., 2015. Microcosmos sous nos pieds. *Sciences et Avenir*, 819, 56-59

Rillig, M.C., Wright, S.F., Allen, M.F. and Field, C.B., 1999. Rise in carbon dioxide changes soil structure. *Nature*, 400, 628

Salome, C., Coll, P., Lardo, E., Villenave, C., Blanchart, E., Hinsinger, P., Marsden, C., Le Cadre, E., 2014. Relevance of use-invariant soil properties to assess soil quality of vulnerable ecosystems : The case of Mediterranean vineyards. *Ecological Indicators*, 43, 83–93

Salome, C., Coll, P., Lardo, E., Metay, A., Villenave, C., Blanchart, E., Hinsinger, P., Marsden, C., Le Cadre, E., 2016. The soil quality concept as a framework to assess managementpractices in vulnerable agroecosystems : A case study in Mediterranean vineyards. *Ecological Indicators*, 61, 456–465

Villenave, C., Jimenez, A., Guernion, M., Pérès, G., Cluzeau, D., Mateille, T., Martiny, B., Fargette, M., Tavoillot, J., 2013. Nematodes for Soil Quality Monitoring: Results from the RMQS BioDiv Programme. *Open Journal of Soil Science*, 3, 30-45

Villenave, C., Oumar Ba, A., Rabary, B., 2009. Analyse du fonctionnement biologique du sol par l'étude de la nématofaune : semis direct versus labour sur les hautes terres près d'Antsirabé (Madagascar). *Etude et Gestion des Sols*, 16, 369-378

Wright, S.F., Upadhyaya, A. and Buyer, J.S., 1998. Comparison of N-linked oligosaccharides of glomalin from arbuscular mycorrhizal fungi and soils by capillary electrophoresis. *Soil Biology and Biochemistry*, 30, 1853-1857

Wright, S.F., and Upadhyaya, A., 1999. Quantification of arbuscular mycorrhizal fungi activity by the glomalin concentration on hyphal traps. *Mycorrhiza*, 8, 283-285

Annexes

Annexe 1 : Extrait du dossier de presse 2016 sur le CAP

Respectueux et innovant

6

Vers une agriculture 100% biologique

80% des propriétés viticoles gérées par le CAP sont travaillées en agriculture biologique, afin d'obtenir de manière respectueuse, des résultats qualitatifs et durables. La Provence possède un climat sain et favorable à la culture biologique. Le Cabinet d'Agronomie Provençale soutient donc avec une attention particulière les domaines dans leur démarche de reconversion vers cette agriculture qui, selon lui, constituera le standard de demain.

Enrichie par la biodiversité

Au-delà du soin apporté à la terre, le CAP cherche à maintenir la polyculture chère à la Provence ainsi que les rotations nécessaires à l'enrichissement des sols. Historiquement, cette région a toujours vu pousser des vergers, des fleurs, des vignes, des oliviers, des amandiers et une grande variété d'arbres fruitiers. Si le cabinet est spécialisé dans la viticulture, il ne souhaite pas mettre en place de monoculture systématique qui saturerait les sols et qui, dans certains cas, défigurerait le paysage provençal.

Dynamisée par des pionniers de la biodynamie

Convaincu que l'agriculture biologique constituera bientôt la norme, le CAP cherche déjà d'autres solutions encore plus innovantes et se tourne vers la biodynamie. Considérant la terre dans son ensemble comme un être vivant, cette technique est aujourd'hui la seule à adopter un point de vue global dans son approche de la nature : prévenir plutôt que guérir, en créant des conditions de vie harmonieuses entre terre, plante et environnement.

La **biodynamie** intègre les différents aspects de l'agriculture biologique, mais se singularise par une prise en considération des rythmes de la nature et des cycles lunaires. Elle utilise des préparations végétales de type homéopathique visant à restaurer un équilibre et à revitaliser le végétal plus qu'à le soigner en cas de maladie.

Cette vision de l'agriculture permet également d'améliorer la **qualité de la terre** par la présence d'une grande variété de micro organismes. Des racines plus denses, plus allongées favorisent un meilleur enracinement de la plante et, grâce à l'apport d'énergie nécessaire à une fructification harmonieuse, un meilleur développement des feuilles et des fleurs.



Pierre GUERIN,
l'expert en biodynamie

En rejoignant le CAP en 2008, Pierre Guérin, bordelais d'origine, a apporté un regard complémentaire sur l'activité du cabinet. Diplômé en 1993 de l'école d'Ingénieur-Œnologue de l'ENITA de Bordeaux, Pierre Guérin a construit son expérience par de très nombreuses vinifications à l'étranger : Barossa Valley en Australie, la Toscane, Malte...

C'est à Cahors, puis en Dordogne, que son activité d'œnologue consultant a démarré et s'est développée pendant plus de dix ans. Cette période lui a également permis de conseiller de grands vignobles à l'étranger : en Espagne notamment et en Inde, plus récemment, où un partenariat a été mis en place avec ce pays émergent, en termes d'œnologie... Le mariage de son expérience bordelaise et du savoir-faire provençal du CAP se révèle particulièrement efficace.

Formation : Ingénieur ENITA Bordeaux, Œnologue Université Bordeaux, expert judiciaire près la Cour d'Appel d'Aix en Provence





Projet REACTI-Sols

TERRAPOLIS a permis la structuration d'un réseau d'agriculteurs autour de gisements en matières organiques, plateformes de broyage et/ou compostage, centres équestres, assurant ainsi une valorisation de ces déchets dans des circuits les plus courts possibles. Les pôles d'économie circulaires créés sont ainsi capables de ré-enrichir les sols du territoire et d'apporter des solutions durables à la valorisation de déchets dont les quantités sont en constante augmentation. Aujourd'hui notre réseau s'associe à quelques acteurs et investi dans le projet REACTI-Sols qui a pour objectif de développer une approche agronomique de la fertilité des terres cultivées et de leur entretien en tenant compte de paramètres techniques, mais également de la mise en œuvre d'une approche socio-territoriale qui place les agriculteurs au centre des écosystèmes qu'ils travaillent (en particulier leurs sols) afin de mieux appréhender leurs rapports aux changements, qu'ils soient techniques, culturels ou sociaux.

➤ Les partenaires du projet REACTI-Sols :

MICROTERRA, bureau d'études spécialisé dans la valorisation des matières organiques par compostage, basé en Languedoc Roussillon, apporte au projet son expertise technique sur le terrain mais aussi sa compétence en développement de projets territoriaux (autour du compostage) ancrés dans l'économie circulaire. Ils contribuent activement à la dynamique collaborative de ce projet et apportent leur vision et leurs principes tournés vers l'Economie Sociale et Solidaire.

Fort de ses expériences, MICROTERRA a accompagné la FR CIVAM Languedoc Roussillon dans sa réponse à l'appel à projet de l'ADEME sur l'économie circulaire grâce au compostage à la ferme de déchets verts et bio déchets qu'elle a remporté en 2015 et intervient en tant que partenaire privilégié sur le projet. MICROTERRA est co-fondateur de TERRAPOLIS avec l'objectif d'inscrire la démarche de compostage à la ferme dans la durabilité, la traçabilité et la qualité au service des collectivités et des agriculteurs.

Le Cabinet d'Agronomie Provençale est spécialisé dans le suivi de domaines viticoles et Oléicoles régionaux dans des terroirs d'exception mais avec des sols souvent très dégradés.

Les conseillers accompagnent les agriculteurs depuis la plantation, la production mais également la vinification et la commercialisation des productions agricoles.

La demande des clients est de plus en plus tournée vers une production en agriculture biologique.

Pour y répondre une démarche de revitalisation des sols de la région est en cours. L'ambition étant de pouvoir renforcer les sols avec des amendements de haute qualité fabriqués à la ferme à partir de produits organiques d'origine locale suivant des cahiers des charges établis en concertation avec les agriculteurs.

Le laboratoire PROTEE de l'Université de Toulon mène depuis de nombreuses années des travaux sur la qualité et la maturité des matières organiques.

Nous avons mis en place, avec l'appui scientifique de ses chercheurs, un travail de terrain visant à évaluer l'impact environnemental du compostage à la ferme.

Le Lycée d'Aix Valabre, qui gère une exploitation agricole, a pour mission, proposée par le Ministère de l'Agriculture, d'assurer une transition dans ses pratiques de fertilisation vers une utilisation unique d'apports organiques.

Dans cet objectif, une expérimentation pluriannuelle en vigne et grandes cultures a débuté en 2016. Elle doit permettre de valider les démarches techniques visant à des productions viticoles et de grande culture sans apport d'engrais chimiques.

Dans le cadre de ces travaux, nous allons tester différents amendements organiques ainsi que l'évolution des pratiques culturales nécessaires à l'usage de ces produits.

Nous souhaitons également vérifier si cette transition dans les pratiques d'entretien des sols permet d'assurer des productions qualitatives et de bon rendement agronomique.

Le cabinet d'études « Territoires sociaux », est spécialisé depuis plusieurs années dans les démarches de médiations environnementales, notamment au sein du monde agricole. L'approche sociologique ici proposée vise à mettre en évidence les mécanismes à l'œuvre en matière de changements, qu'ils soient techniques ou culturels, plus généralement sociaux. Une enquête auprès des agriculteurs impliqués (entretiens, groupes d'échanges...), mais aussi des autres acteurs des filières concernées, permettra ainsi de mieux comprendre certains freins à l'innovation, et à l'utilisation de produits organiques mais aussi quels seraient les éléments moteurs permettant ces changements et leur diffusion dans les réseaux régionaux pertinents.

La Chambre d'Agriculture des Bouches du Rhône participent à la mise en place et au suivi des protocoles d'essai, fait remonter les besoins de terrain qu'elle identifie et peut diffuser les connaissances acquises auprès d'un large public.

➤ **A terme, l'objectif de cette collaboration est de :**

- Permettre au plus grand nombre d'agriculteurs qui le souhaitent d'assurer une transition de l'entretien de leurs sols à partir de gisements locaux et qualitatifs de matière organique.

Cette utilisation massive d'amendement organique de qualité contrôlée produite au niveau des territoires peut être un outil de régénération des sols méditerranéens répondant ainsi au double objectif des « quatre pour mille » proposé par le Ministre de l'Agriculture et une valorisation locale et de déchets.

➤ **Mais pour mener à bien une telle action au niveau de la région, il est nécessaire de développer plusieurs outils et indicateurs techniques :**

- Evaluer l'impact environnemental de compostages rustiques bord champs sur le sol et l'environnement proche de la zone de compostage. Ce travail est réalisé avec l'appui scientifique du laboratoire Protee de l'Université de Toulon mène depuis de nombreuses années des travaux sur la qualité et la maturité des matières organiques en partenariat avec le Lycée agricole d'Aix Valabre.

- Identifier des indicateurs originaux, faciles à mettre en œuvre de la richesse et de la biodiversité des sols.
Ces indicateurs vont permettre de réaliser des diagnostics initiaux sur les exploitations mais également d'évaluer les effets des apports massifs de matières organiques
- Définir des références locales de compostage rustique bord champ et un guide de bonnes pratiques à l'usage des agriculteurs, afin d'assurer une valorisation des déchets en produits qualitatifs dans le respect des contraintes environnementales.
Pour ce faire, nous souhaitons nous appuyer sur une station pilote de compostage rustique en cours de réalisation au lycée Agricole d'Aix Valabre et sur notre réseau d'agriculteurs, composteurs de proximité.

➤ **Le volet communication n'est pas oublié, il est même le pivot de notre projet :**

Nous souhaitons, pour assurer la réussite de cette transition agricole, mettre en place plusieurs outils de communication.

Au centre du dispositif : une **plateforme internet** d'échange, de communication et de formation sur les techniques de travail des sols.

Cette plateforme doit permettre d'accompagner les agriculteurs dans leurs démarches de valorisation des matières organiques, et pour cela être dans une démarche de simplification pour la rendre accessible.

L'objectif est également d'assurer une **communication plus généraliste** auprès des collectivités et du grand public autour des enjeux de la gestion des déchets et de leur valorisation. Une partie du site internet y sera dédié.

Notre réseau de valorisation de matières organiques répond déjà localement à des enjeux de traitement des déchets végétaux et de certains fumiers (filère cheval, élevage de moutons). Par notre action c'est plus de 90.000 tonnes qui ont été valorisées en 2015.

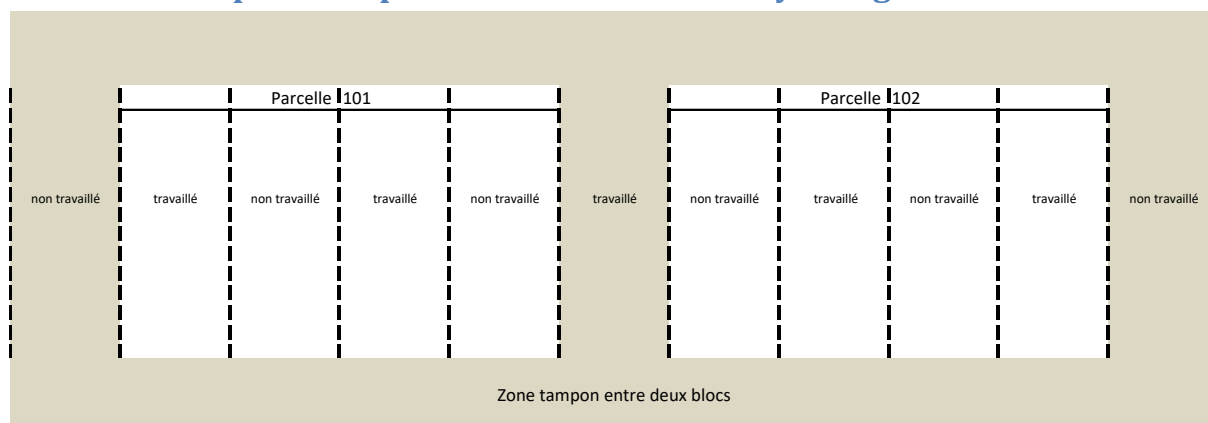
Ce travail complémentaire doit permettre, à terme, d'accompagner les agriculteurs dans leur changement de pratiques de fertilisation.

Notre contribution, en s'inspirant des principes de l'économie circulaire, permet une valorisation locale de quantités très importantes de matières à des coûts très faibles en limitant transports et interventions superflus.

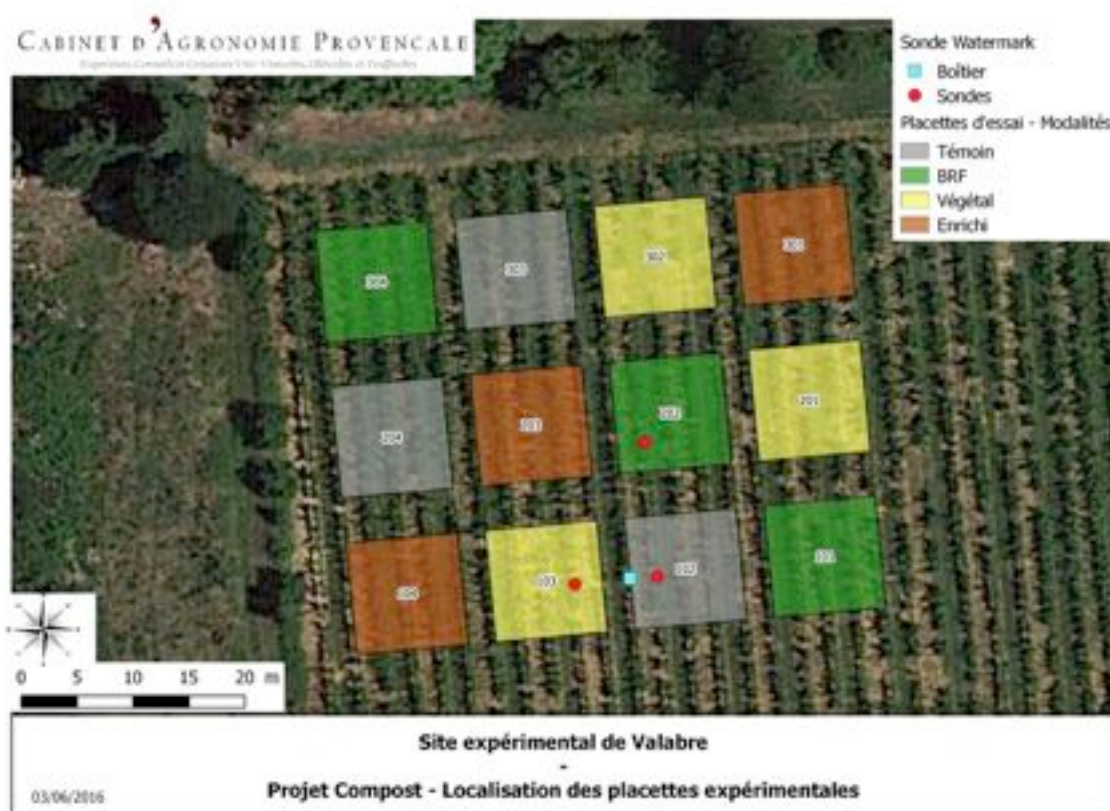
Nous espérons ainsi améliorer l'efficacité de l'utilisation des ressources nécessaires à l'entretien des sols agricoles de la région.

Notre approche permet une valorisation économique, sociale et environnementale du gisement en déchets verts en constante augmentation dans la région.

Annexe 3 : Dispositif expérimental de l'essai au lycée agricole de Valabre



Plan d'une placette expérimentale



Plan de l'essai

Annexe 4 : Dispositif expérimental de l'essai au Château de Beaupré



Plan de l'essai

Annexe 5 : Fiche protocole de mesure de la communauté lombricienne (extrait du site internet bio-indicateurs de l'université de Rennes) :

FICHE OUTIL F2

Les vers de terre

G. Peres, D. Cluzeau, H. Hottel, N. Delavaud & Coll.
UMR 6553 EcoBio, Université de Rennes 1
Contact : daniel.cluzeau@univ-rennes1.fr



DESCRIPTION DE L'INDICATEUR

Nom de l'indicateur : Les vers de terre, densité et biodiversité des communautés lombriciennes.

Rôle écologique de l'indicateur testé : Les vers de terre, également appelés lombriciens, sont des organismes invertébrés du sol connus de tous. Etant composé d'une succession d'anneaux, ils font parti de l'embranchement des annélides. Les lombriciens sont considérés comme ingénieurs du sol par leur rôle important dans le fonctionnement de l'écosystème. Ils agissent sur le processus de décomposition et de brassage de la matière organique, sur la structuration des sols et sur le fonctionnement hydrique des sols. Les conséquences de ces bioturbations permettent, entre autre, la réduction de l'érosion, la stimulation de l'activité microbienne, l'augmentation de la production végétale ainsi que la réduction des risques de pollution.

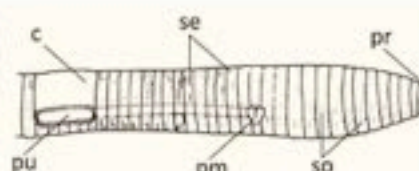


Figure 1 : cittellum (c), pore mâle (pm), prostomium (pr), puberculum (pu), segmente (se), soies (so)

Une centaine d'espèces ont été répertoriées en France Métropolitaine et sont classés en 3 groupes appelés **catégories écologiques** selon Bouché (1972).



1 Les épigés : Espèces de petite taille (1-5 cm) et de couleur foncé (rouge, marron). Ils vivent en surface (1^{er} cm) et dans des amas de matière organique morte (litière de forêt, fumier, compost, déchets verts, boues de station d'épuration, ...). Ils ne creusent peu ou pas de galeries dans le sol.

Rôle : participation au fractionnement de ces matières organiques mortes. (Régime alimentaire : saprophage)



2 Les anéciques : Espèce de grande taille, entre 10 et 110 cm. Leurs couleurs varient du rouge au brun, avec couramment un gradient de couleur de la tête vers la queue. Ils vivent sur l'ensemble du profil du sol (galeries jusque 5 m de long). Ils creusent des galeries permanentes verticales à sub-verticales et ouvertes en surface, qui permet à l'eau de s'infiltrer. Ils déposent leurs déjections à la surface du sol (turricules = tortillons), augmentant la rugosité de surface ce qui limite l'érosion.

Rôle : fragmentation de la matière organique morte en surface, enfouissement et brassage de cette matière organique avec le sol ingéré. (Régime alimentaire : sapro-géophage).



Notes : deux grands genres majoritaires d'anéciques sont rencontrés

- les têtes rouges : lombriciens (du genre *Lumbricus*) très souvent rencontrés. Très réactifs aux changements de températures et d'humidités, ils reprennent leur activité quand les conditions d'humidité du sol sont favorables. Leur réseau de galerie est très peu ramifié.
- les têtes noires : ces lombriciens (du genre *Aporrectodea*) ont systématiquement une période d'inactivité entre Juin et Août et créent un réseau de galeries très ramifié.



3 Les endogés : Espèces de taille variable entre 1 et 20 cm. Ils sont très peu colorés à apigmentés (gris, rose ou vert). Ils vivent essentiellement dans les trente premiers centimètres du sol. Ils creusent des galeries temporaires horizontales à sub-horizontales.

Rôle : création d'une « structure grumeleuse », influençant la rétention et l'infiltration de l'eau dans le sol. (Régime alimentaire : géophage).



Biologie du lombricien

- les individus ont une croissance continue jusqu'au stade adulte (pas de métamorphose) : le juvénile devient un sub-adulte, puis un adulte,
- le stade adulte est caractérisé par l'apparition des pores mâles visibles et le clitellum (la fameuse bague) profubérant,
- la majorité des espèces se reproduit sexuellement et sont hermaphrodites protandres (les vers sont mâles avant de devenir femelles), mais elles nécessitent un accouplement,
- les lombriciens produisent des cocons qui contiennent entre 1 et 7 embryons,
- les épigés produisent une centaine de cocons par an contre une douzaine pour les anéciques,
- les lombriciens sont principalement actifs en sortie d'hiver - début de printemps et en automne et sont inactifs dans les sols pas assez humides (sols gelés en hiver ou secs en été),
- la durée de vie varie de 3 mois (épigés) à 5-8 ans (endogés, anéciques).

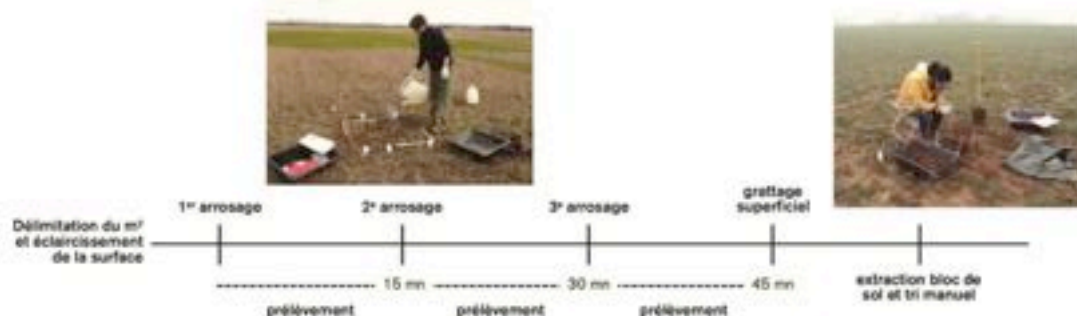
Type d'indicateur : Bioindicateur d'effet, ils rendent compte de l'état et des usages de l'écosystème sol. Ils répondent aux 4 règles qui définissent un bon indicateur à savoir pertinence, fiabilité, sensibilité et reproductibilité.

DESCRIPTION DE LA MÉTHODE DE PRÉLÈVEMENT

Procédures et protocole d'échantillonnage : L'étude des communautés lombriciennes nécessite un minimum de 3 répétitions par parcelle, en identifiant une zone représentative du milieu. Selon l'hétérogénéité de la parcelle, une augmentation des répétitions est souhaitable. Les variations saisonnières et fluctuations journalières (températures et luminosité) ont une influence sur la qualité de la capture des individus de certaines espèces. Il est important de réaliser les prélèvements lors de la période d'activité des lombriciens : en sortie d'hiver - début de printemps et en automne. Les prélèvements ne sont pas réalisables sur sols gelés et en cas de fortes températures et de fort ensoleillement.

Description simplifiée de la méthode de mesure :

- La première étape consiste à dégager la surface qui va être échantillonnée (ex : couper délicatement et exporter la végétation en place ; ôter délicatement la litière ou les amas organiques écorces)
- Les lombriciens sont ensuite prélevés selon la méthode Bouché (1972) et la norme ISO 23611-1 adaptée au contexte agro-pédoclimatique (Cluzeau et al., 1999 et 2003) : trois arrosages de solution formolée (3 x 10 L, concentrations 0,25 %, 0,25 %, 0,4 %) sont appliqués sur 1 m², à 15 minutes d'intervalle. Les lombriciens, adoptant un comportement de fuite en réponse aux propriétés urticantes du formol, sont prélevés à la surface du sol. Un grattage superficiel (1 cm de profondeur) est ensuite réalisé pour récupérer les individus non récoltés (durée de prélèvement : 1 heure). Cette étape est complétée par un prélèvement physique : un bloc de sol (0,25 x 0,25 x 0,20 m de profondeur) est extrait au sein du m² et trié manuellement (durée du tri : 15-30 minutes).



- Les lombriciens capturés sont fixés et stockés dans une solution formolée (concentration de 4%) permettant de conserver la pigmentation des individus ou dans de l'alcool pour une conservation de l'ADN.

Pré-traitement des échantillons : Une détermination de l'espèce est réalisée au laboratoire, en prenant en compte plusieurs caractères morphologiques externes : la taille, la couleur, la forme du premier segment (prostomium), la répartition des soies et le positionnement et la forme des caractères sexuels (clitellum: bague, puberculum, pores mâles). Une pesée individuelle permet par la suite d'évaluer la biomasse totale.



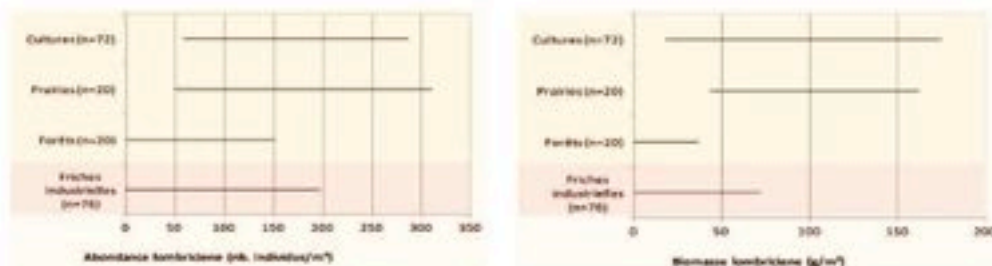
Paramètres mesurés : Les paramètres de sortie permettent une caractérisation des communautés à différents niveaux :

- global : abondance (nb ind/m²) et biomasse (g/m²) totales,
- fonctionnel : abondance par catégories écologiques,
- taxonomique (ou spécifique) : richesse (nombre d'espèces), diversité et équitabilité (importance relative des espèces).

INTERPRÉTATION DES RÉSULTATS

Gamme de variation des valeurs lombriciennes et référentiels

Gammes de variation des abondances et des biomasses lombriciennes sur l'ensemble des sites du programme Bioindicateur 2 (excluant les valeurs extrêmes, premier et dernier déciles).

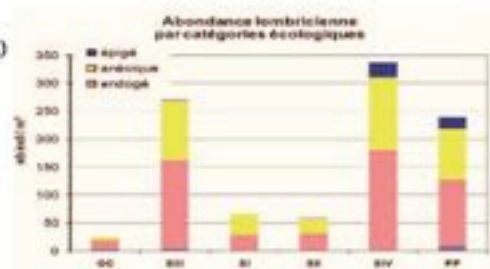


Les données acquises montrent que les gammes de variations des abondances sont très étendues, celles des biomasses étant plus restreintes, notamment en prairie, forêt et friches industrielles. Ces étendues de gammes reflètent la variabilité des modes de gestion en prairie et en cultures. Ces valeurs viennent compléter celles acquises à l'échelle régionale sur 109 sites en Bretagne dans le programme RMQS Biodiv (Cluzeau et al, 2012) et celles en phase d'acquisition de l'Observatoire Participatif de Vers Terre (OPVT) constituant ainsi une première base de valeurs de référence.

Les premiers résultats du programme bioindicateur 2 montrent l'intérêt de l'utilisation i) des abondances et biomasses lombriciennes pour caractériser l'état biologique d'un sol, ii) des catégories écologiques et des traits biologiques dans la caractérisation fonctionnelle des sites contaminés et sites agricoles, renseignant ainsi des potentiels services écosystémiques rendus par ces sols (Pérez et al, 2011).

Exemple d'application sur un site «Yvetot» du programme Bioindicateur II (gestionnaire ESITPA)

Statut	Description
GC	Grande culture, culture depuis 1950
SI	Deuxième année de prairie de restauration après 1 an de culture
SII	Deuxième année de prairie de restauration après 2 ans de culture
SIII	Troisième année de prairie de restauration après 3 ans de culture
SIV	Deuxième année de prairie après 1 an de culture
PP	Prairie permanente, exploitée en 1990



Les prairies permanentes (PP) et de longue durée (SIV) offrent les meilleures conditions pour le développement des lombriciens (abondances et biomasses très élevées, forte présence des épigés et anéctiques). À l'inverse, la grande culture (GC) a des effets négatifs sur les communautés lombriciennes du fait du labour annuel et de l'exportation de la matière organique. Deux années après une mise en prairies d'un système de culture (SI et SII), l'abondance globale et celle des anéctiques augmentent (facteur 3), démontrant la rapidité du bénéfice de l'incorporation d'une

prairie dans une rotation. Par ailleurs, une culture de 2 ans ayant un long passif prairial (SII) présente une abondance élevée : les 2 années de labour n'ont pas encore affecté les communautés. La réponse des différentes catégories écologiques de lombricienne est une information importante car cela va conditionner le fonctionnement du sol (infiltration, dynamique des nutriments). Les lombriciens et les catégories écologiques, rendant compte des contraintes /avantages du passif et du présent cultural et prairial, peuvent donc être utilisés comme outil de gestion des rotations.

INTÉRÊTS ET LIMITES DE L'INDICATEUR

- + Réponse rapide de l'indicateur après modification du milieu.
- + Forts liens avec d'autres paramètres biologiques (exemple : microbiologie).
- + Méthode d'échantillonnage utilisée depuis de nombreuses années (existence de références).
- + Détermination des catégories écologiques (→ rôle écologique et fonctionnel) abordable par tous.
- Période et conditions de milieu à respecter pour les prélèvements
- Effet préleveur potentiel pour le tri manuel (surtout sur les petits individus)
- Expertise nécessaire pour obtenir une détermination spécifique et sub-spécifique

DE LA RECHERCHE VERS LE TRANSFERT DE CONNAISSANCE

L'OPVT (Observatoire Participatif des Vers de Terre) est un outil d'évaluation simplifié de la biodiversité des sols à l'aide des vers de terre. http://ecobiosol.univ-rennes1.fr/OPVT_accueil.php

Son objectif principal est d'acquiescer, à partir d'une méthode de prélèvement simplifiée, des références nationales en terme d'abondance lombricienne (nb vers de terre/m²), pour différents contextes pédoclimatiques et usages des sols. L'OPVT est ouvert à un large public tel que les agriculteurs, les scolaires, les jardiniers et les gestionnaires de milieux naturels ou anthropisés. À terme, ces observateurs pourront positionner leurs données par rapport aux références obtenues dans des contextes similaires, et orienter leurs usages pour une meilleure préservation de la biodiversité des sols.

Les atouts de l'OPVT

- 1- L'OPVT est un outil pédagogique qui propose une méthode de prélèvement simple, peu contraignante et accessible à tous.
- 2- L'OPVT permet une observation instantanée des vers de terre et leur classification, sur le terrain, selon les trois catégories écologiques décrites précédemment : épigés, anéciques (tête rouge et tête noire) et endogés. Ces catégories écologiques sont facilement identifiables à l'œil nu, via des critères de taille et de couleur détaillés sur une fiche de terrain (disponible sur le site WEB de l'OPVT).
- 3- L'OPVT est un outil progressif. Pour s'adapter aux demandes des différents publics intéressés, des moins exigeants aux plus demandeurs, 5 niveaux d'implication ont été définis.
 - Les niveaux 1 et 2 sont destinés au grand public et requièrent, par conséquent, peu de temps, peu de matériel et les données recueillies sont principalement qualitatives. Les vers de terre sont extraits par des coups de bêche (niveau 1) ou par une solution d'eau moutardée appliquée sur un carré de 50*50 cm (niveau 2).
 - Le niveau 3, détaillé ci-après, est à destination d'un public plus sensibilisé aux problématiques associées à la gestion écologique ou durable des sols tels que les agriculteurs et animateurs des GDA-GEDA-GVA-CIVAM, les animateurs de bassin versant ou encore les enseignants d'écoles d'agriculture : après la préparation de la zone de prélèvement de 1 m² (délimitation, éclaircissement de la végétation), appliquer de manière homogène une solution moutardée (300 g de moutarde fine et forte, soit 2 petits pots, dilués dans 10 L d'eau) ; les vers sont capturés pendant 15 minutes. Répéter la manipulation une seconde fois. Déterminer les vers à l'aide de la fiche d'identification fournie au niveau de la catégorie écologique. Compter les individus par groupe et reporter les résultats sur la feuille de terrain.
 - Les niveaux 4 et 5 sont destinés aux réseaux et programmes souhaitant investir dans la détermination des espèces les plus communes (niveau 4) ou de l'ensemble des espèces (niveau 5) présentes sur la parcelle échantillonnée.

BIBLIOGRAPHIE

Cluzeau D., M. Guémion, R. Chaussod, et al.,
Integration of biodiversity in soil quality monitoring : Baselines for microbial and soil fauna parameters for different land-use types. *European Journal of Soil Biology*, 49 : 63-72.

Péres, G., F. Vandembulcke, M. Guémion et al., 2011. The use of earthworms as tool for soil monitoring, characterization and risk assessment. Example of a Bioindicator Programme developed at National scale (France). *Pedobiologia* 54, 77-87.

CONTACTS

Université de Rennes 1 - UMR-CNRS 6553 EcoBio.
Station Biologique de Palmpont - 35380 Palmpont

Daniel CLUZEAU, Guénola PERES
Tel : 02 99 61 81 80 / 02 99 61 81 74
e-mail : daniel.cluzeau@univ-rennes1.fr
e-mail : guenola.peres@univ-rennes1.fr

Annexe 6 : Fiche protocole du test bêche

Fiche protocole pour l'indicateur de l'état global de fonctionnement du sol : Test à la bêche

Présentation de l'indicateur

Cette méthode a été développée à partir de 1930 par Johannes Görbing, un conseiller de la région de Hambourg, pour déterminer l'état de fonctionnement d'un sol.

Elle permet de caractériser de nombreux paramètres physiques du sol en réalisant un mini-profil structural.

Lorsque les conditions sont favorables cette méthode permet aussi d'estimer la quantité de vers de terre dans le sol. La meilleure période pour dénombrer les vers de terre est située entre janvier et avril : le sol se réchauffe et est assez humide. Lorsqu'il fait trop chaud, les vers entrent en léthargie. Ils ne ressortiront qu'à l'automne.



Matériel

Bêche ou louchet, bâche, bac à fond rigide, couteau, mètre, tarière

Protocole

Prélever un bloc de sol d'une profondeur de 40 cm à l'aide d'une bêche. Le prélèvement sera effectué dans de bonnes conditions d'humidité du sol. Ce dernier devra être suffisamment humide pour permettre d'enfoncer la bêche dans le sol et de sortir un bloc de 40 cm de profondeur qui se tienne malgré un sol qui peut être travaillé. Néanmoins, le sol ne doit pas être trempé pour permettre l'observation.

On pourra comparer les « bêchées » des parcelles étudiées à une d'un talus ou d'une parcelle non cultivée la plus proche.

On pourra utiliser une tarière pour voir en profondeur s'il y a des horizons discontinues ou des anomalies quelconques.

Mesure :

Une note de 1 à 5 est attribuée aux paramètres suivants :

- Aspect de surface (pourcentage de recouvrement végétal qui permet d'évaluer la proportion de sol protégé contre des fortes pluies par exemple ; présence d'une croûte de battance ou d'agrégats visibles ; présence de turricules)
- Transition des horizons continue/discontinue
- Enracinement : renseigne sur la porosité du sol (densité de racines et développement de l'enracinement latéral et en profondeur)
- Couleur : elle indique l'état d'aération et de saturation du sol mais traduit aussi la matière organique, plus la couleur est sombre, plus le taux d'humus est important. L'engorgement en eau se traduit par des points de rouilles ou la



Les mottes avec une surface rugueuse et grumeleuse ont beaucoup de porosité visible à l'œil. Il est possible d'y voir des racines et des galeries de vers de terre. Dans la nomenclature, ces mottes sont nommées les mottes F (gamma).



A l'opposé certaines mottes sont très tassées. Leur surface est lisse et plane. Les arêtes droites et il n'y a pas de porosité visible à l'œil. Ce sont les mottes Δ (delta).



A l'intermédiaire, certaines mottes ont une surface relativement lisse, témoin de tassement. Mais quelques racines et/ou galeries sont quand même visibles. Ces mottes sont nommées Δ0 (delta zéro).

Figure 1 : Aide à la détermination de l'état interne des mottes

formation de gley aux teintes bleutées. On attribuera donc deux notes ; une pour le taux de matière organique et l'autre pour l'hydromorphie.

- Odeur : elle dépend de l'état de décomposition des matières organiques. Une mauvaise rappelle la pourriture (asphyxie du sol) et une bonne celle du terreau ou du sous-bois.
- Evolution des matières organiques : évaluée d'après l'état et la répartition de la matière organique.

Après drop test (le bloc de terre extrait est lâché dans un bac rigide à hauteur de taille soit 1 mètre environ) deux paramètres sont évalués :

- Taille des mottes : après le premier lancé de la « bêche », il faut écarter la terre fine et les agrégats les plus fins pour ne reprendre que les plus grosses mottes (trois lancés). Ensuite il faut trier les mottes et les disposer sur le support prévu à cet effet.
- Porosité des agrégats (cf figure 1)

	A	B	C
1	Pacelle		Date
2			
3	Paramètre évalué	Note (0 à 5)	Commentaires
4	Aspect de surface		
5	Transition des horizons		
6	Développement racinaire		
7	Taux de matière organique		
8	Hydromorphie		
9	Résidus de matière organique		
10	Odeur		
11	Drop test		
12	Taille des mottes		
13	Porosité des agrégats		

Figure 2 : Grille d'évaluation d'un "bêché" de sol

Bibliographie :

Chambre d'agriculture Région Alsace, Octobre 2012. *Test à la Bêche*. Fiche Observer la structure de son sol.

Gautronneau, Y., et Manichon, H., 1987. Guide méthodique du profil cultural, CERE-ISA, Lyon, 71 p.

Manichon H., 1982. Influence des systèmes de culture sur le profil cultural : élaboration d'une méthode de diagnostic basée sur l'observation morphologique - Thèse Doct. Ing. SC. Agronomiques INA-PG, 214 pp.

Annexe 7 : Fiche protocole du test litterbag

Fiche protocole pour l'indicateur global de l'activité des sols : le litter-bag

Présentation de l'indicateur

Nous nous inspirons de l'indicateur LEVA-bag qui prend son nom de l'unité de recherche LEVA (légumineuses, ecophysiologie végétale, agroécologie) conçu par l'école supérieure d'agriculture d'Angers. C'est un indicateur global de l'activité biologique des sols qui repose sur un outil simple : le litter-bag (cf figure 1). Il permet d'estimer le taux de dégradation d'une matière organique de référence en calculant sa perte de masse au cours du temps. La mesure est réalisée au champ et reflète l'activité des organismes décomposeurs qui traversent la maille du sachet qui contient la matière organique.



Figure 1 : litter-bag

Le test est réalisé avec une paille de référence, normalisée. La période d'enfouissement est sortie d'hiver début de printemps pour avoir une activité maximale de la microfaune du sol. Pour avoir une perte significative de masse (de 18 à 88% en fonction du type de sol), les sacs doivent rester 4 mois dans le sol. Etant donné la période des essais (début mai) et la sécheresse actuelle (moyennes pluviométriques de l'hiver et du début de printemps sur la région PACA faibles), nous allons préférer une matière organique plus tendre, qui sera digestible plus facilement : le foin. En effet, l'activité des organismes du sol est fortement atténuée par des conditions de sécheresse.

Matériel

Le sac :

- Apiculture.net : Toile filtrante en nylon avec maille de 600 μm (13€ le tissu de dimension 125*160 soit 64 sachets de 100*150). La conception est à faire.
- Aliexpress : sachet de thé en nylon avec maille de 100 μm (7€ le lot de 100 sachets de dimension : 65*80). Le remplissage est plus complexe : le sac étant petit il faut découper la matière organique.
- Finlandek : boule à infuser en inox 3€/pièce

Matière organique : 5g de foin (AOC foin de Crau : Moulin de la Levade, route d'Eyguières, 13300 Salon de Provence)

Balance précise (mg) : ICV

Jalons pour repérer le dispositif avec numéro du litterbag

Marqueur indélébile

Bêche

Mètre

Etuve : ICV

Tamis réalisé avec la même toile filtrante en nylon avec maille de 600 μm .

Découper la toile filtrante en nylon de cotes 200*150, la plier en 2 et enagrafer les bords.

Peser avec une balance de précision (mg) 5g de foin.

Mettre le foin dans le sachet et le fermer avec des agrafes

Nombre de litter-bags

Il est nécessaire de prévoir au minimum 3 litterbag par prélèvement afin de pouvoir discriminer une valeur aberrante et de minimiser le risque d'absence de données (perte d'un sachet pour des raisons quelconques). Nous prévoyons 3 dates de prélèvement. Ainsi 9 litterbag seront à prévoir par modalité.

Protocole

Enfouir les sacs à 10 cm de profondeur sur une même zone : au milieu de l'inter-rang.

Récupérer la première série de 3 sacs après 3 mois (début août), la seconde après 4 mois (début septembre), la dernière après 5 mois (début octobre) à moins que les indicateurs de prélèvement montrent une dégradation plus rapide de la matière organique.

La pesée :

Passer à l'étuve les sachets afin que la matière organique soit totalement sèche. Une durée de 48 heures à 63°C nous assure ce résultat. Attention, au-delà de 80°C l'azote organique commence à se dégrader.

Ouvrir le sachet à l'aide d'un cutter. Verser le contenu sur le tamis afin d'éliminer les particules de terre qui auraient pu pénétrer à l'intérieur.

Peser la matière sèche restante avec la même balance utilisée pour former les sachets.

On obtient le graphique : masse de matière sèche en fonction du temps

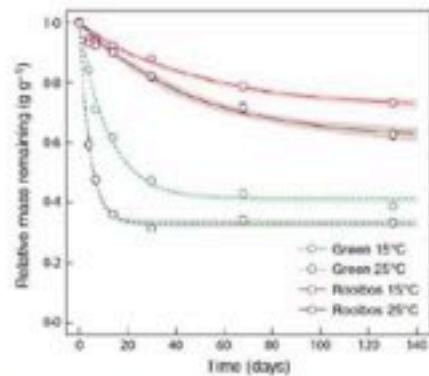


Figure 2 : Perte de masse sèche en fonction du temps - Source : J. A. Keuskamp et al., 2013

Bibliographie :

Keuskamp J. A. et al., 2013. Tea bag index : A novel approach to collect uniform decomposition data across ecosystems. *Methods in Ecology and Evolution*, Novembre 2013.
Cannavacciuolo M., 2015. Le LEVA-bag. D'un outil de terrain pour évaluer la vitesse de dégradation des matières organiques dans vos sols... A la genèse d'un laboratoire analytique. Journées nationales de l'innovation agricole, Angers, France, 2-3 Novembre 2015.

Annexe 8 : Fiche protocole de mesure de la biomasse microbienne et de la diversité (extrait du site internet bio-indicateurs de l'université de Rennes) :

FICHE OUTIL M4

Biomasse Moléculaire Microbienne du sol

Un indicateur d'abondance des microorganismes

Plateforme GenoSol – INRA de Dijon



POURQUOI L'ABONDANCE DES MICROORGANISMES ?

La quantité de **biomasse microbienne** est un facteur déterminant dans la qualité biologique des sols en raison de son rôle dans la **régulation, la transformation et le stockage des nutriments**. Cette quantité de biomasse microbienne est par ailleurs démontrée comme étant un **indicateur sensible, robuste et précoce des perturbations d'un sol** (modifications de pratiques agricoles, contaminations, changement de statut organique, etc... ; Ranjard et al, 2006 ; Chaussod et al, 1996). La mesure de la **Biomasse Moléculaire Microbienne** est une technique permettant d'estimer l'abondance des microorganismes dans le sol **au même titre que la méthode de fumigation/extraction** (Marstorp et al, 2000 ; Blagodatskaya et al, 2003 ; Widmer et al, 2006 ; Bouzaiane et al, 2007). Sa **facilité de mise en œuvre** lui permet d'être appliquée en moyen débit. Pour exemple, cette Biomasse Moléculaire a été mesurée sur les 2 200 sols du Réseau de Mesure de la Qualité du Sol (RMQS) et une cartographie nationale a donc pu être établie ainsi que le premier référentiel d'interprétation associé à cette mesure (Dequiedt et al, 2011). Ces travaux ont permis de confirmer la robustesse et l'intérêt de cet indicateur pour détecter les modifications dues aux changements d'usage des sols.

Sur 1 hectare (éq. Carbone)

2 500 kg de bactéries
3 500 kg de champignons microbiens
soit l'équivalent de 6 à 10 vaches

COMMENT SONT RÉALISÉES ET INTERPRÉTÉES LES ANALYSES ?

La mesure de la Biomasse Moléculaire Microbienne **correspond au rendement d'extraction d'ADN du sol**. La technique repose sur la quantification de l'ADN extrait directement à partir de l'échantillon de sol. Les protocoles d'extraction et de quantification développés et standardisés par la plateforme GenoSol (Terra et al, 2012 ; Plassart et al, 2012) prennent environ **1 journée par échantillon** avec la possibilité de traiter jusqu'à trente échantillons en même temps :

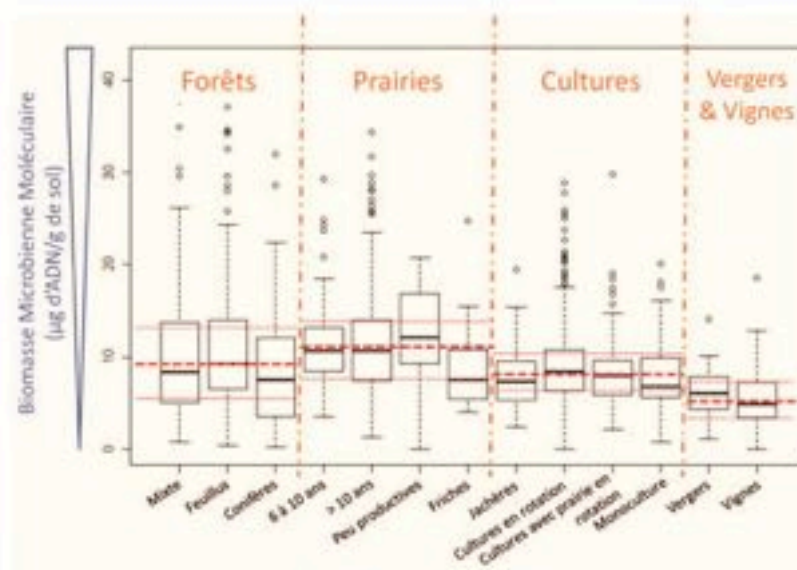
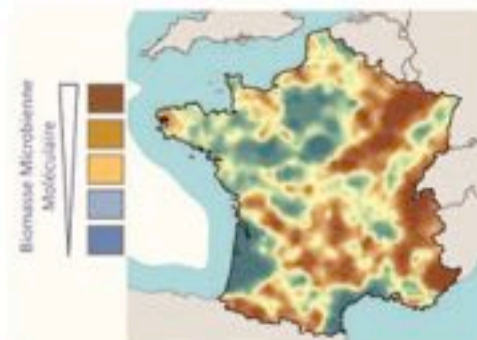
- **Extraction d'ADN** à partir de 1 g de sol sec (protocole **standardisé correspondant à une optimisation du protocole normalisé ISO-TC 90-SC4-WG 4N119**),
- **Dépôt et migration de l'ADN dans un gel d'agarose**,
- **Coloration de l'ADN** dans le gel à l'aide du **Bromure d'Éthidium (BET)**.



Gel d'agarose obtenu après migration, coloration et révélation de l'ADN sous les rayons ultraviolets

- Révélation de l'ADN coloré au BET qui fluoresce sous les rayons ultraviolets,
- Quantification de l'ADN par comparaison avec une gamme étalon.

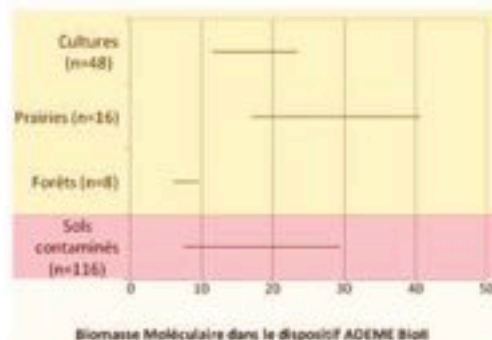
L'interprétation des résultats de l'indicateur se fait par comparaison des valeurs avec un référent local (situation témoin) ou par positionnement dans le référentiel national (MicroSol database®) à l'aide d'outils mathématiques adaptés (comparaison de moyennes, cartographie, arbres de décision, etc...).



Référentiel d'interprétation (MicroSol database®) : distribution spatiale de la Biomasse Moléculaire et gamme de variation en fonction du mode d'usage des sols à l'échelle de la France.

APPLICATION À DES PROBLÉMATIQUES DE TERRAIN

Les études à l'échelle du territoire national (RMQS ; Dequiedt et al, 2011) ont démontré la **prédominance des paramètres locaux** (mode d'occupation des sols, types de sol, pratiques, etc...) par rapport aux paramètres globaux (climat, localisation, géomorphologie, etc...) sur la gamme de **variation de la Biomasse Moléculaire microbienne**.



INTÉRÊTS ET LIMITES DE L'INDICATEUR BIOMASSE MOLÉCULAIRE

Intérêt :

- Forte sensibilité aux changements de pratiques, d'itinéraires culturaux (travail du sol, amendements organiques, etc...),
- Techniques d'acquisition et d'interprétation standardisées (normalisées), éprouvées et faciles à mettre en œuvre pour un coût faible (de l'ordre de 50 €),
- Matériel utilisé peu spécifique (centrifugeuse, pipettes, etc...) ; seul le broyeur de sol est spécifique (FastPrep de MPBio),
- Etape obligatoire, l'extraction d'ADN est nécessaire avant toutes autres caractérisations moléculaires,
- Disponibilité d'un référentiel (MicroSol database[®]) permettant l'interprétation des résultats obtenus (RMQS, réseau, sites expérimentaux INRA et ITA, etc...).

Limites :

- Forte sensibilité au statut organique et au type de sol qui peut masquer d'autres effets (contamination métallique ou HAP par exemple).



- Blagodatskaya E.V., Blagodatskii S.A. & Anderson T.H., 2003 - Quantitative isolation of microbial DNA from different types of soils of natural and agricultural ecosystems. *Microbiology*, 72 : pp 744-749.
- Bouzaiane O., Cherif H., Saidi N., Jedidi N. & Hassen A., 2007 - Effects of municipal solid waste compost application on the microbial biomass of cultivated and non-cultivated soil in a semi-arid zone. *WaterManagement Research*, 25 : pp 334-342.
- Dequiedt S., Saby N.P.A., Lelièvre M., Jolivet C., Thioulouse J., Toutain B., Arrouays D., Bispo A., Lemanceau P. and Ranjard L., 2011 - Biogeographical Patterns of Soil Molecular Microbial Biomass as Influenced by Soil Characteristics and Management. *Global Ecology and Biogeography*, 20 : pp 641-652.
- Maersterp H., Guan X. & Gong P., 2000 - Relationship between dsDNA, chloroformable C and ergosterol in soils of different organic matter contents and pH. *Soil Biology and Biochemistry*, 32 : pp 879-882.
- Ranjard L., Echali A., Nowak V., Lejon D.P.H., Nouaim R. & Chaussod R., 2006 - Field and microcosm experiments to evaluate the effects of agricultural copper treatment on the density and genetic structure of microbial communities in two different soils. *FEMS Microbiology Ecology*, 58 : pp 303-315.
- Terrat S., Christen R., Dequiedt S., Lelièvre M., Nowak V., Regnier T., Bachar D., Plessart P., Wincker P., Jolivet C., Bispo A., Lemanceau P., Maron P.A., Mougel C., Ranjard L., 2012 - Molecular biomass and MetaTaxonomic assessment of soil microbial communities as influenced by soil DNA extraction procedure. *Microbial Biotechnology*, 5 : pp 135-141.
- Widmer F., Rasche F., Hartmann M. & Fliessbach A., 2006 - Community structure and substrate utilization of bacteria in soils from organic and conventional farming systems of the DOK long-term field experiment. *Applied Soil Ecology*, 33 : pp 294-307.
- Plessart P., Terrat S., Thomson B., Griffiths R., Dequiedt S., Lelièvre M., Regnier T., Nowak V., Bailey M., Lemanceau P., Bispo A., Chabbi A., Maron P.A., Mougel C., Ranjard L., 2012 - Evaluation of the ISO Standard 11063 DNA Extraction Procedure for Assessing Soil Microbial Abundance and Community Structure. *PLoS ONE* 7(9): e44279. doi:10.1371/journal.pone.0044279.

CONTACT

Plateforme GenoSol - INRA de Dijon - 17 rue de Sully - BP 86510 - 21065 Dijon Cedex France
http://www.dijon.inra.fr/plateforme_genosol

RANJARD Lionel (Dir. Scientifique) - Tel : +33 (0) 3 80 69 30 88 - lionel.ranjard@dijon.inra.fr

DEQUIEDT Samuel (Dir. Technique) - Tel : +33 (0) 3 80 69 33 83 - samuel.dequiedt@dijon.inra.fr

Annexe 9 : Fiche protocole de mesure de l'indicateur de la nématofaune (extrait Elisol) :



LA NEMATOFAUNE Bio-indicateur pertinent pour étudier l'état biologique de terrains contaminés

Villeneuve C. ELISOL Environnement
Contact : cecile.villeneuve@elisol-environnement.fr

POURQUOI LES NEMATODES ?

Le savaiez-vous ?

Bien qu'ils soient très peu connus du grand public, les nématodes sont les organismes pluricellulaires (les métazoaires) les plus abondants sur terre ! Certains sont visibles à l'œil nu (ce sont en général des parasites d'animaux) mais la plupart sont microscopiques. Ils ont colonisé tous les milieux (eaux douces, mers, végétaux, sols, ...). La plupart des nématodes du sol sont vermiformes et ont une longueur de l'ordre de 1 mm.

Ils sont particulièrement intéressants pour être utilisés comme bio-indicateurs de l'état du sol car :

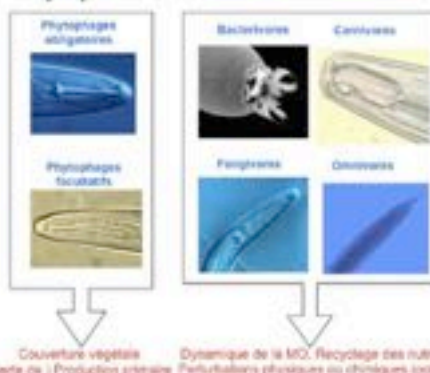
- ils sont ubiquistes, présents dans tous les milieux, sous tous les climats, à toutes les latitudes ;
- ils sont abondants : dans un sol ordinaire on trouve de l'ordre de 1 million de nématodes par m² ;
- ils présentent une grande diversité taxonomique et fonctionnelle (différents comportements alimentaires, des capacités à coloniser le milieu très variables) pouvant être synthétisée par l'identification des 70 familles majeures ;
- ils jouent le rôle clé de micro-régulateurs dans la dynamique des éléments nutritifs dans le sol ;
- ils sont sensibles, de façon variable, aux conditions du milieu et aux perturbations physiques ou chimiques ;
- ils sont faciles à échantillonner et la méthode d'étude est normalisée (ISO 23611-4).

Les nématodes peuvent être distingués selon leur groupe trophique, chacun renseignant une fonctionnalité du sol. Les six principaux groupes trophiques de nématodes trouvés dans le sol sont :

les nématodes phytophages (obligatoires ou facultatifs) qui renseignent sur la nature et l'état de la couverture végétale et, éventuellement, le risque de perte de rendement ;

les nématodes microbivores (bactérovores et fongivores) qui renseignent sur le compartiment microbien, la dynamique de la matière organique et le recyclage des nutriments ;

les nématodes omnivores et carnivores qui reflètent les perturbations physiques ou chimiques du milieu.



COMMENT SONT REALISEES LES ANALYSES ?

L'analyse de la nématofaune du sol est réalisée à partir d'échantillons de sol de 150 à 300g. Le prélèvement est simple et peut être réalisé par les gestionnaires de site. L'analyse, par contre, est à réaliser par des spécialistes de la nématofaune. Les échantillons de sol sont traités au laboratoire dans les 15 jours qui suivent leur prélèvement car l'analyse nécessite que les nématodes soient vivants. Les nématodes sont extraits du sol, dénombrés et identifiés selon la norme ISO 23611-4. Ce travail permet d'obtenir un tableau d'abondance des différents taxons.

Sur la base de la composition et de l'abondance de la nématofaune du sol sont calculés des indices :

- SI : indice de structure qui reflète la stabilité du milieu, plus il est élevé moins le milieu est perturbé. Il est fonction de l'abondance relative de plusieurs familles (les bactérovores, les fongivores, les omnivores et les prédateurs) ;
- EI : indice d'enrichissement qui donne une indication sur la dynamique des nutriments. Il est fonction de l'abondance de la guildes de la composante d'enrichissement. Cet indice est particulièrement utile dans les agro-systèmes. L'EI augmente avec la disponibilité en nutriments.
- Trois autres indices, le MI (indice de maturité), le PPI (indice des nématodes phytophages) et le NCR (indice des voies de décomposition de la matière organique) sont également utilisés pour déterminer l'effet de différentes perturbations sur le sol.

APPLICATION A UNE PROBLEMATIQUE DE TERRAIN CONTAMINE

L'étude a été conduite dans la zone de contamination d'une ancienne usine métallurgique dont les retombées de poussières ont engendré une contamination essentiellement pluri-métallique des sols sur plusieurs kilomètres alentours. Afin de tester la sensibilité de l'indice nématode, SI, au regard du niveau de contamination, la zone d'étude a été divisée en 4 sous-zones correspondant chacune à un bois (plantations plurispécifiques) :

- fortement contaminé (principaux polluants : [Pb]= 2 500 ppm - [Cd]= 35 ppm),
- moyennement contaminé ([Pb]= 725 ppm - [Cd]= 13 ppm),
- faiblement contaminé ([Pb]= 325 ppm - [Cd]= 5 ppm) et
- témoin ([Pb]= 50 ppm - [Cd]= 1 ppm).

Dans chacune de ces sous-zones des échantillons composites de sol ont été réalisés.

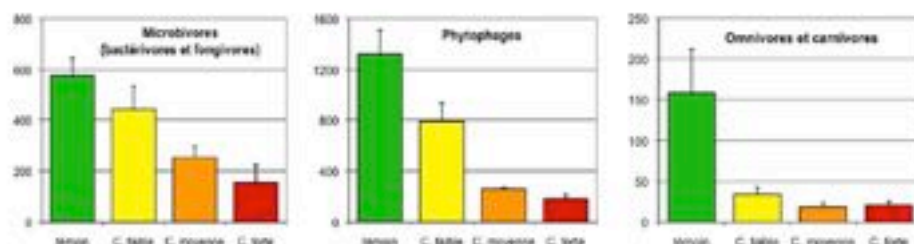


Figure 1 : Abondance (individus pour 100g de sol sec) des trois grands types de nématodes du sol : phytophages, microbivores, omnivores / prédateurs

Comme l'illustre la figure 1, l'analyse de l'abondance des trois grands types de nématodes du sol montre que :

- plus la contamination est importante, moins les nématodes sont abondants ;
- les nématodes omnivores et carnivores, qui sont des organismes connus pour leur sensibilité aux polluants, sont présents à des densités très faibles pour les trois sites contaminés par rapport au site témoin.

Le calcul de l'Indice de Structure (SI) permet de distinguer le bois témoin des bois contaminés (figure 2). En effet, le SI est plus élevé pour le bois témoin que les bois contaminés. Cet indice, calculé en tenant compte de l'abondance relative des différentes guildes fonctionnelles de nématodes, indique que la communauté de nématodes du bois témoin est plus complexe et contient des taxons fragiles.

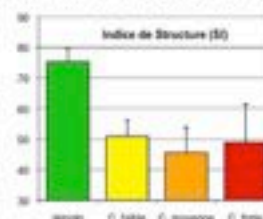


Figure 2 : indice de structure

EN CONCLUSION

La nématofaune s'est montrée pertinente pour l'évaluation de l'état du sol dans le contexte des terrains contaminés par les métaux lourds. En effet,

- les densités de nématodes microbivores et phytophages décroissent en suivant le gradient de contamination ;
- les nématodes omnivores et carnivores sont drastiquement réduits même à partir de concentrations faibles ;
- dans les situations contaminées, la micro chaîne trophique du sol est plus réduite que dans la situation témoin ;
- l'indice structure permet de distinguer un site témoin d'un site contaminé, sans toutefois permettre de discriminer les sites en fonction de leur niveau de pollution ;
- la mesure s'est révélée très répétable : la structure des communautés de nématodes (abondance de nématodes de 35 familles) est homogène entre les répétitions d'une même modalité et est différente en fonction du degré de contamination.

Annexe 10 : Devis pour la mesure de la biomasse microbienne ainsi que celle de la nématofaune



Acteur de votre environnement

154, rue Georges Guynemer
34130 MAUGUIO
Tel: 04 67 20 10 90
Fax: 04 67 20 10 28

Site web: www.celesta-lab.fr
Email: contact@celesta-lab.fr

Devis N° DE00000983

Date : 14/06/2016

Date de validité : 14/07/2016

Monsieur Pierre GUERIN
CABINET D'AGRONOMIE PROVENCALE
Ferme Saint Georges
580, Chemin de Saint Georges
83143 LE VAL

Affaire suivie par : Xavier Salducci

Code	Description	Qté	P.U. HT	% Rem	Montant HT
	Echantillons Lycée Aix - Valabres				
DIAMANT	Diagnostic agronomique DIAMANT: bilan complet de la physico-chimie et de la biologie du sol <ul style="list-style-type: none"> • Prise en charge, préparation, tamisage à 5 mm, mesure humidité, pH eau et KCl, Calcaire total, Phosphore assimilable (par défaut Joret-Hilbert), bases échangeables (K2O, MgO, CaO, NaO), CEC metson, granulométrie simplifiée (A, L, S). • fractionnement granulométrique des matières organiques: MO totale (C et N total), séparation MO liée et MO libre et dosage (C et N libre), C/N de la MO totale, de la MO liée et de la MO libre • dosage de la biomasse microbienne par fumigation/ extraction, éléments contenus dans la biomasse microbienne (calcul) • potentiel de minéralisation du carbone et de l'azote par incubation contrôlée (28/ 28°C) 	1,00	255,20	20,00	204,16
ELITE	Interprétation ELITE: <ul style="list-style-type: none"> • Positionnement des différentes détermination grâce au moteur d'interprétation Celesta-lab. • Commentaire écrit rappelant le rôle des différents compartiments organo-biologiques, et expliquant le fonctionnement et la dynamique du sol analysé. • Synthèse des points faibles et des points forts de votre parcelle. • Propositions d'actions personnalisées vous permettant de répondre à vos objectifs et vos problématiques. 	1,00	64,00		64,00
AT2	pH eau, Carbone organique, MO, Biomasse microbienne, Rapport C microbien / C organique, Eléments fertilisants (N, P, K, Ca, Mg) stockés dans la Biomasse microbienne, Commentaires	5,00	81,80	20,00	327,20
	Chateau Beaupré				
AT2	pH eau, Carbone organique, MO, Biomasse microbienne, Rapport C microbien / C organique, Eléments fertilisants (N, P, K, Ca, Mg) stockés dans la Biomasse microbienne, Commentaires	3,00	81,80	20,00	196,32
TXT00003	Quantité de terre par échantillon: 800g par échantillon minimum				
TXT00005	Délai pour le rendu des analyses DIAMANT ELITE : 6 semaines après réception des échantillons				
TXT00004	Délai pour le rendu des analyses AT2 : 4 semaines après réception des échantillons				

Devis gratuit. Les prix TTC sont établis sur la base des taux de TVA en vigueur à la date de remise de l'offre. Toute variation de ces taux sera répercutée sur les prix.



Adresse Administrative

ELISOL environnement
219 rue des Jacquetières
01700 Beynost
Tel/fax : 04-66-71-92-59
Tel : 06-19-20-13-43
helene.ceremonie@elisol-environnement.fr

SIRET : 53067636000031
N° TVA : FR05530676360

A l'attention de :

Eric Navarro
Terre et compost
eric.navarro@terre-et-compost.com

Adresse d'envoi des échantillons

ELISOL environnement
ZA des Tourels
10 avenue du Midi
30 111 Congénies

DEVIS

Date	Numéro
3/06/2016	2016-e25

Référence	Descriptif	nombre	Coût unitaire HT	Montant HT
Bio-A	Analyse de la nématofaune (sur échantillon de sol)	9	260,00	2340,00
	Remise (15%)			-351,00
	Analyse de la nématofaune sur compost	3	260,00	offertes

Total HT	1 989,00 €
TVA 20 %	397,80 €
Total TTC	2 386,80 €

Devis à renvoyer daté et signé
par courrier, fax ou email
ou à joindre avec vos échantillons

Acceptation du devis et des Conditions Générales de Vente

Date Signature ou Tampon

ELISOL environnement sarl Siret : 53067636000023- Capital 18 000 € RCS Montpellier
Siège social 10 parc Club du Millénaire, 1025 Ave H. Bequerel 34000 Montpellier

Annexe 11 : Tableau de synthèse du réseau parcellaire disponible à l'étude

Annexe 12 : Analyse Sadef du compost enrichi

Rapport d'analyses COMPOSTS

TERRE ET COMPOST

283 chemin des Brulades

13160 CHATEAURENARD

Exploitation

Echantillon

TERRE ET COMPOST

Type échantillon : Compost

Référence Commande :

Réf. échantillon :

SA003.31.2 / COMPOST FERMIER LOT COQUELICOT FINAL / 13044.SA003.31.2
Amendement organique

Dossier : LAB16-20

Numéro Labo. : D-00012-16

Date de prélèvement :

28/12/2015

Date de réception :

05/01/2016

Date début analyses :

05/01/2016

Date fin analyses :

19/01/2016

Date d'édition :

19/01/2016

Propriété	Résultats (/brut)	Unités	Méthodes
Masse Volumique et pF			
Masse Volumique compactée	0.473	Kg/l	NF EN 13040
Caractérisation Agronomique	Résultats : / sec / brut	Unités	Méthodes
* Matière Sèche	60.5	%	NF EN 13040
pH eau (sur extrait 1/5)	8.7		NF EN 13037
* Azote Total (N)	18.8	g/kg	Méthode Dumas NF EN 13654-2
Azote Ammoniacal (N-NH ₄)	0.20	g/kg	NF EN 13652 (Extr.eau 1/5 / trait)
Azote Nitrrique (N-NO ₃)	< 0.01	g/kg	NF EN 13652 (Extr.eau 1/5 / trait)
Azote Uréique (N)	< 1	g/kg	Méthode Interne MA7-15 Colorimétrie POA8
Azote Organique (N)	18.1	g/kg	Calcul (N total - N minéral)
* Matière Organique par Perte au feu	512	g/kg	NF EN 13039
Carbone Organique (C)	256	g/kg	Calcul à partir de la perte au feu (MO/2)
Rapport C/N	13		Calcul : C organique / N total
Rapport MO/N	28		Calcul : Matière organique / N organique
* Phosphore (P ₂ O ₅)	8.33	g/kg	NF EN 13650 eau régale, Dos. ICP MS NF EN ISO 17294
* Potassium (K ₂ O)	17.4	g/kg	NF EN 13650 eau régale, Dos. ICP MS NF EN ISO 17294
* Calcium (CaO)	103	g/kg	NF EN 13650 eau régale, Dos. ICP MS NF EN ISO 17294
* Magnésium (MgO)	10.0	g/kg	NF EN 13650 eau régale, Dos. ICP MS NF EN ISO 17294

Informations complémentaires	Résultats (/sec)	Unités	Méthodes
Composés indigénables retirés	16	%	Fornage & tit manuel

Remarque(s) / Observations(s) :

Masse Volumique non réalisable suivant la norme => MV estimée

Exploitation

Echantillon

TERRE ET COMPOST

Type échantillon : Compost

Référence Commande :

Réf. échantillon :

SA003.31.2 / COMPOST FERMIER LOT COQUELICOT FINAL / 13044.SA003.31.2
Amendement organique

Dossier : LAB16-20

Numéro Labo. : D-00012-16

Date de prélèvement : 28/12/2015

Date de réception : 05/01/2016

Date fin analyses : 19/01/2016

Date début analyses : 05/01/2016

Date d'édition : 19/01/2016

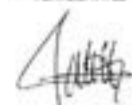
Les résultats sont exprimés sur le produit brut ou le sec (voir les en-têtes de colonne) débarrassé des inertes
imbroyables (a/o équivalent à g/kg ou kg/t).

Thierry SCHMITT

Technicien Département MATIERES
FERTILISANTES

* : Analyses SADEF réalisées sous accréditation.

La validation technique des résultats vaut pour la signature du responsable des analyses.



13160 CHATEAURENARD

Echantillon

Type échantillon : Composite

Reference Commands

Numéro Labo. : D-00012-16

Rés. échantillon :
SA003.31.2 / COMPOST FERMIER LOT COQUELICOT FINAL / T3044.SA003.31.2
Amendement organique

Date début analyses : 05/01/2014

Date début analyses : 05/01/2014

Date d'édition : 19/01/2016

Résultats

Units

Conformité

		C : Conforme	NC : Non Conforme	Valeur nominale	Unité maximale
* Matière Sèche	NI (044-05)	40.5	C	40	100
* Azote Total (N) (/brut)	NI (044-05)	11.4	C	0/00	30
* Phosphore (P2O5) (/brut)	NI (044-05)	5.04	C	0/00	30
* Potassium (K2O) (/brut)	NI (044-05)	10.5	C	0/00	30
* Matière Organique par Perte au Feu (/brut)(1)	NI (044-05)	309	C	0/00	1000
Rapport C/N	NI (044-05)	13	C		200
* N + P2O5 + K2O (/brut)	NI (044-05)	26.9	C	0/00	70
* Azote organique (en % de l'azote total) (/brut)	NI (044-05)	96	C	86	100

En cas d'avis et d'interprétations, ceux-ci sont hors champ d'accréditation.

^a Analysis 540FF revealed no new information.

L'accréditation de la section Laboratoire du COFRAC atteste de la compétence technique des laboratoires pour les seuls essais couverts par l'accréditation, essais identifiés par une étoile (*). Ce rapport d'analyse concerne seulement l'échantillon soumis aux analyses. Ce rapport ne doit pas être reproduit sans l'accréditation du laboratoire d'essai. La reproduction de ce rapport d'essai n'est autorisée que sous sa forme intégrale.

Ce rapport comporte : 3 page(s)
Rapport d'analyses n° : D-00012-16

Version n°0
Page 3/3

Annexe 13 : Résultats d'analyses formule Diamant Elite et AT2



Laboratoire d'analyse, d'étude et de conseil en
biologie des sols et valorisation des produits
organiques

CLIENT

Neviere Michel

Lycée Agricole d'Aix Valabre

13548 cedex GARDANNE

Intermédiaire

Cabinet d'Agronomie
Provençale / 2348

Diagnostic agronomique - Physico-chimie et biologie du sol -

Votre parcelle: CALADOC N°7 Parcelle AIX-VALABRE T0 enherbé

ECHANTILLON

N° de laboratoire: 1622-026

Date de réception: 02/06/2016

Commune: 13120 GARDANNE



RENSEIGNEMENTS

Profondeur de prélèvement: 0-20 cm

Culture: Vigne

Charge en cailloux: 10 %

Masse de terre fine par ha (T/ha) 2890

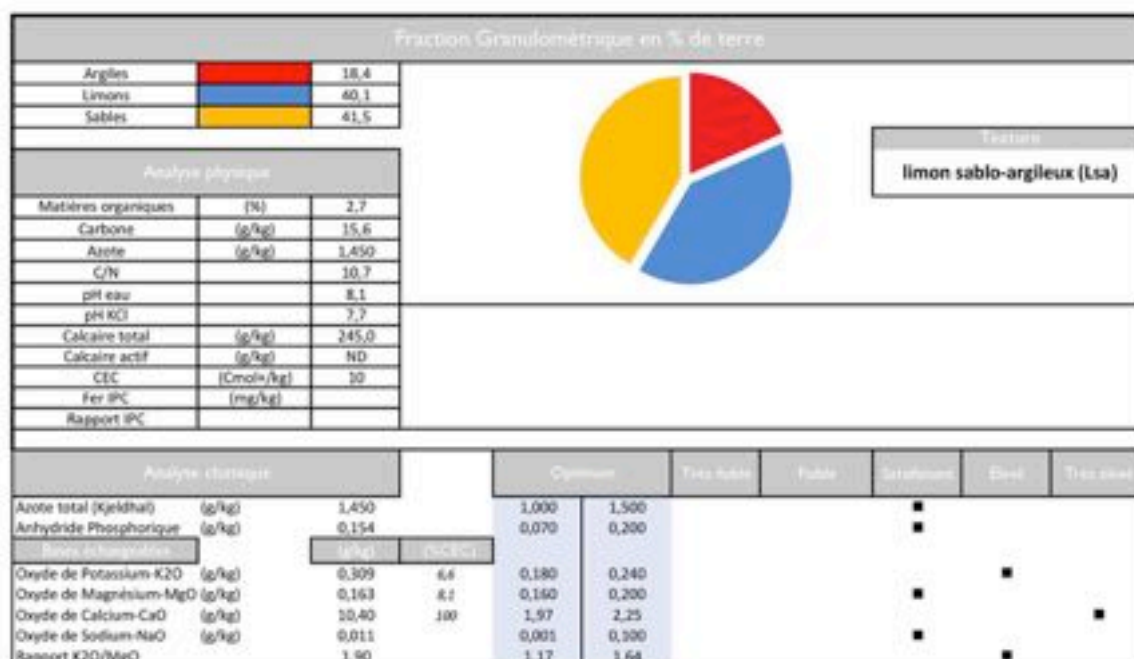
Densité apparente (T/m3) 1,6



Celesta-lab - 154 rue Georges Gaymer - 34130 MAUGUIO - Tél : 04 67 20 10 90 - Fax : 04 67 20 10 28 18/07/2016 page N°1



CARACTÉRISATION PHYSICO-CHIMIQUE



CARACTÉRISATION DES MATIÈRES ORGANIQUES DU SOL

FRACTION / Dégradation	Granulométrie %	Carbone				Azote			C/N
		mg/g fraction	mg/g sol	%C total	MO %	mg/g fraction	mg/g sol	%N total	
MO libre / rapide	41,5	18,5	7,7	49	1,32	1,460	0,607	41,8	12,7
MO liée / très lente	58,5	13,5	7,9	51	1,36	1,443	0,844	58,2	9,4
MO totale	100		15,6		2,68		1,450		10,7



COMPARTIMENT VIVANT: BIOMASSE MICROBIENNE

Numéro Labo 1622-026

Carbone g/kg terre	Biomasse Microbienne (BM)		Éléments minéraux stockés dans la BM (calculés en kg/ha)				
	mg C/kg terre	en % C	N	P	K	Ca	Mg
15,6	523	3,4	226	175	347	21	21
fort	très fort	très fort					

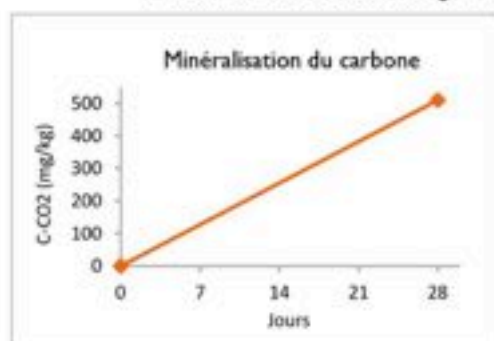


COMPARTIMENT VIVANT: ACTIVITES MICROBIENNES

✓ INDICE D'ACTIVITÉS MICROBIENNES (IAM)



✓ ACTIVITÉS MICROBIOLOGIQUES MINÉRALISATRICES DE C et N : dégradabilité de la MO



BILAN DES ÉLÉMENTS MINÉRALISÉS							
CARBONE				AZOTE			
C organique (g/kg T)	C minéralisé (mg/kg/28j)	Index de minéralisation (%)	Cm/BM	N total (g/kg)	N minéralisé (mg/kg/28j)	Index de minéralisation (%)	Fourrière potentielle N (t)
15,6	510,0	3,3	34,9	1,5	37,6	2,6	362,4
fort	très fort	fort			très fort	très fort	

Mauguio, le 18/07/16
Xavier Salducci
Directeur du Laboratoire

CARACTÉRISATION PHYSICO-CHIMIQUE

Sol limon sablo-argileux (Lsa) à pH basique, aucune aptitude à la fissuration, risque moyen à élevé d'asphyxie, très faible stabilité structurale.

CARACTÉRISATION DES MATIÈRES ORGANIQUES

o MO totale :

Les caractéristiques initiales de votre sol ainsi que votre itinéraire technique ont permis la constitution d'un stock de matière organique conséquent. La teneur de 2,68% représente environ 77,2 tonnes par hectare sur une profondeur de 20 cm.

o MO libres : réserves à moyen terme

La teneur en matières organiques libres (matières organiques les plus facilement consommées) est de 1,32%. Cette valeur est très forte : ces matières organiques libres sont le principal apport d'énergie pour la vie du sol, elles sont ici en quantité très importante et témoignent de restitutions organiques importantes et relativement récentes.

Le rapport C/N de la MO libre est de 12,7. Il caractérise une MO correctement évoluée, encore jeune, énergétique pour la faune et la microflore du sol.

o MO liées : réserves à long terme

La teneur en matières organiques liées (matières organiques les plus stables dans le temps) est de 1,36%. Cette valeur est satisfaisante : ces matières organiques, lorsqu'elles sont minéralisées (consommées) par la biomasse du sol, représentent un stock non négligeable d'éléments nutritifs pour la vigne. Elles participent également au maintien d'une bonne stabilité structurale en se liant aux argiles (complexe argilo-humique) et augmentent la résistance aux stress environnementaux (sécheresse, inondations, excès de cuivre...)

Le rapport C/N de la MO liée est de 9,4. Cette valeur est satisfaisante et caractérise des humus bien évolués, fonctionnels, libérant assez facilement de l'azote.

o Équilibre des compartiments libre et lié (équilibre des réserves entre court et long terme) :

Les compartiments organiques de votre sol sont déséquilibrés : les réserves organiques sur le long terme sont très faibles en comparaison avec les réserves à plus court terme (51% contre 49% du carbone total).

COMPARTIMENT VIVANT: BIOMASSE MICROBIENNE

o Taille du compartiment microbien :

Votre sol est très vivant : le compartiment microbien (compartiment vivant majoritaire du sol) est très développé et représente 523mg de carbone par kg de sol sec, soit environ 1505kg par ha pour votre parcelle (pour une profondeur de 20 cm.). La biomasse microbienne est constituée de nombreux éléments (N,P,S...). Cette biomasse se renouvelle rapidement dans le sol rendant ainsi les éléments qu'elle contient potentiellement disponible pour les plantes. La très grande quantité de micro-organismes de votre sol assure donc un stock tampon conséquent en éléments nutritifs. Elle participe également à de nombreuses propriétés agronomiques indispensables aux cultures : porosité (drainage, enracinement), stabilité structurale (anti-érosion). La valeur de biomasse très élevée peut provenir d'apports ou de restitutions organiques récents qui stimulent les organismes du sol en les nourrissant.

o Proportion par rapport au stock de MO :

La biomasse microbienne représente une proportion très importante de la matière organique totale (3,4%). L'environnement sol (exemples : structure, porosité...) et la qualité des restitutions organiques est très favorable au développement de la vie microbienne.

COMPARTIMENT VIVANT: ACTIVITÉS MICROBIENNES

o MO potentiellement minéralisable :

La MO potentiellement minéralisable est la MO qui sera très rapidement consommée par les micro-organismes (sous réserve que de bonnes conditions de température, d'humidité et d'oxygénation soient réunies) : ces derniers utilisent le carbone organique comme source d'énergie pour leur croissance et leur développement. Pour votre sol la quantité de carbone minéralisé à 28 jours est très forte (510mg de carbone par kg de sol sec.). Elle est largement suffisante pour nourrir et développer la biomasse microbienne et la faune du sol. De plus, rapportée à la matière organique totale, la quantité de matière organique rapidement utilisable par la biomasse est importante (indice de minéralisation du carbone = 3,27%). On dit que l'activité de la matière organique est forte. Les matières organiques, de par leur quantité et leur qualité (activité) sont donc propices au maintien et au développement du potentiel biologique du sol.

o Azote potentiellement minéralisable :

l'azote minéralisé en 28 jours en laboratoire en conditions contrôlées (température, humidité) modélise une situation de terrain d'environ 4 mois. Pour votre sol cette quantité est très forte (38mg d'azote par kg de sol sec). De plus, rapportée à l'azote total, cette quantité d'azote rapidement utilisable par les plantes est très importante (indice de minéralisation de l'azote = 2,6%). On dit que l'activité de l'azote de la matière organique est très forte. La mise à disposition d'une quantité considérable d'azote minéral pour la vigne est donc assurée par la quantité de matière organique, mais aussi par sa qualité (activité). La nitrification fonctionne correctement et aboutit très majoritairement à la synthèse de nitrate.

Par extrapolation sur 6 mois, l'activité biologique du sol peut générer environ 162 unités d'azote par hectare.

Xavier Salducci
Directeur du Laboratoire



PROPOSITIONS D'ACTIONS



Conclusions:

Points forts

- # Fertilité minérale satisfaisante
- # Stock organique satisfaisant, forte teneur en MO libre et bonne qualité des MO liées (humus)
- # Biomasse microbienne (BM) très élevée ainsi que le rendement de production de la BM du sol
- # Très fort stock de MO énergétique

Points faibles

- # Sol à texture limono-sablo-argileuse, sensible au tassement et à la structure fragile.
- # Excès de MO libre qui peut être lié à une faible activité faunique
- # Très fort potentiel de minéralisation de l'azote qui peut déstabiliser la production

Propositions

Votre sol présente un potentiel de fertilité biologique très élevé, bien soutenu par une teneur élevée en matière organique. Il est clair que l'enherbement permanent et sans doute de longue durée a été très bénéfique au sol sur le plan de la richesse et de l'activité de la microflore du sol.

De plus, sa fertilité minérale est très satisfaisante et peut se satisfaire d'impasse durant 1 à 2 ans.

Le point faible de ce sol est sa suractivité qui d'une part consomme une quantité importante de matière organique et d'autre part, en cas de stress hydrique important nécessitant la destruction du couvert, libérera un flush d'azote assez important (162 U / 2 = 81 U).

Le rapport MO libre / Moliée est déséquilibré par une forte proportion de MO libre. Cela contribue au fort stock de MO énergétique, ce qui est positif pour le fonctionnement biologique du sol, mais affaiblit le fonctionnement à long terme et les réserves de MO liée (humifiée). D'autre part, on peut s'interroger sur cet excès de MO libre : voir si la compaction ne limite pas l'activité faunique et la consommation de cette MO normalement facilement assimilable.

Afin de conforter la teneur en humus, l'apport régulier d'amendements organiques à fortes stabilités biologiques (fort ISMO, > 70%) comme des compost de fumiers, de matière végétale seule ou en mélange, serait un plus. Cela permettrait d'améliorer le stockage de la MO dans le sol et d'améliorer les propriétés de stabilité structural, porosité et réserve en eau.

Surveiller l'état de compaction du sol qui présente une texture à risque.

Xavier Salducci
Directeur du Laboratoire

CLIENT

Neviere Michel

Lycée Agricole d'Aix Valabre

13548 cedex GARDANNE

Intermédiaire

Cabinet d'Agronomie Provescale

Diagnostic agronomique - Biomasse Microbienne -

Votre parcelle: CALADOC N°7 Parcelle AIX-VALABRE T0 non enherbé



ECHANTILLON

N° de laboratoire: 1622-027

Date de réception: 02/06/2016

Commune: 13120 GARDANNE

RENSEIGNEMENTS

Profondeur de prélèvement: 0-20 cm

Culture: Vigne

Charge en cailloux: 10 %

Masse de terre fine par ha (T/ha): 2700

Densité apparente (T/m3): 1,5

CARACTÉRISATION PHYSICO-CHIMIQUE

Analyse physique		
Matières organiques	(%)	1,9
Carbone	(g/kg)	11,1
Azote	(g/kg)	ND
C/N		ND
pH eau		8,4

COMPARTIMENT VIVANT: BIOMASSE MICROBIENNE

Carbone g/kg terre	Biomasse Microbienne (BM) mg C/kg terre	en % C	Éléments minéraux stockés dans la BM (calculés en g/ha)				
			N	P	K	Ca	Mg
11,1	284	2,6	115	89	75	11	11
satisfaisant un peu fort	fort	très fort					



CARACTÉRISATION DES MATIÈRES ORGANIQUES

o MO totale :

Dans un référentiel viticulture, votre sol présente une teneur satisfaisante en matière organique totale de 1,9%. Elle représente environ 51,3 tonnes par hectare sur une profondeur de 20 cm.

COMPARTIMENT VIVANT: BIOMASSE MICROBIENNE

o Taille du compartiment microbien :

Votre sol est vivant : le compartiment microbien (compartiment vivant majoritaire du sol) est bien développé et représente 284mg de carbone par kg de sol sec, soit environ 767kg par ha pour votre parcelle (pour une profondeur de 20 cm.). La biomasse microbienne est constituée de nombreux éléments (N,P,S...). Cette biomasse se renouvelle rapidement dans le sol rendant ainsi les éléments qu'elle contient potentiellement disponible pour les plantes. La grande quantité de micro-organismes de votre sol assure donc un stock tampon conséquent en éléments nutritifs. Elle participe également à de nombreuses propriétés agronomiques indispensables aux cultures : porosité (drainage, enracinement), stabilité structurale (anti-érosion).

o Proportion par rapport au stock de MO :

La biomasse microbienne représente une proportion très importante de la matière organique totale (2,6%). L'environnement sol (exemples : structure, porosité...) et la qualité des restitutions organiques est très favorable au développement de la vie microbienne.

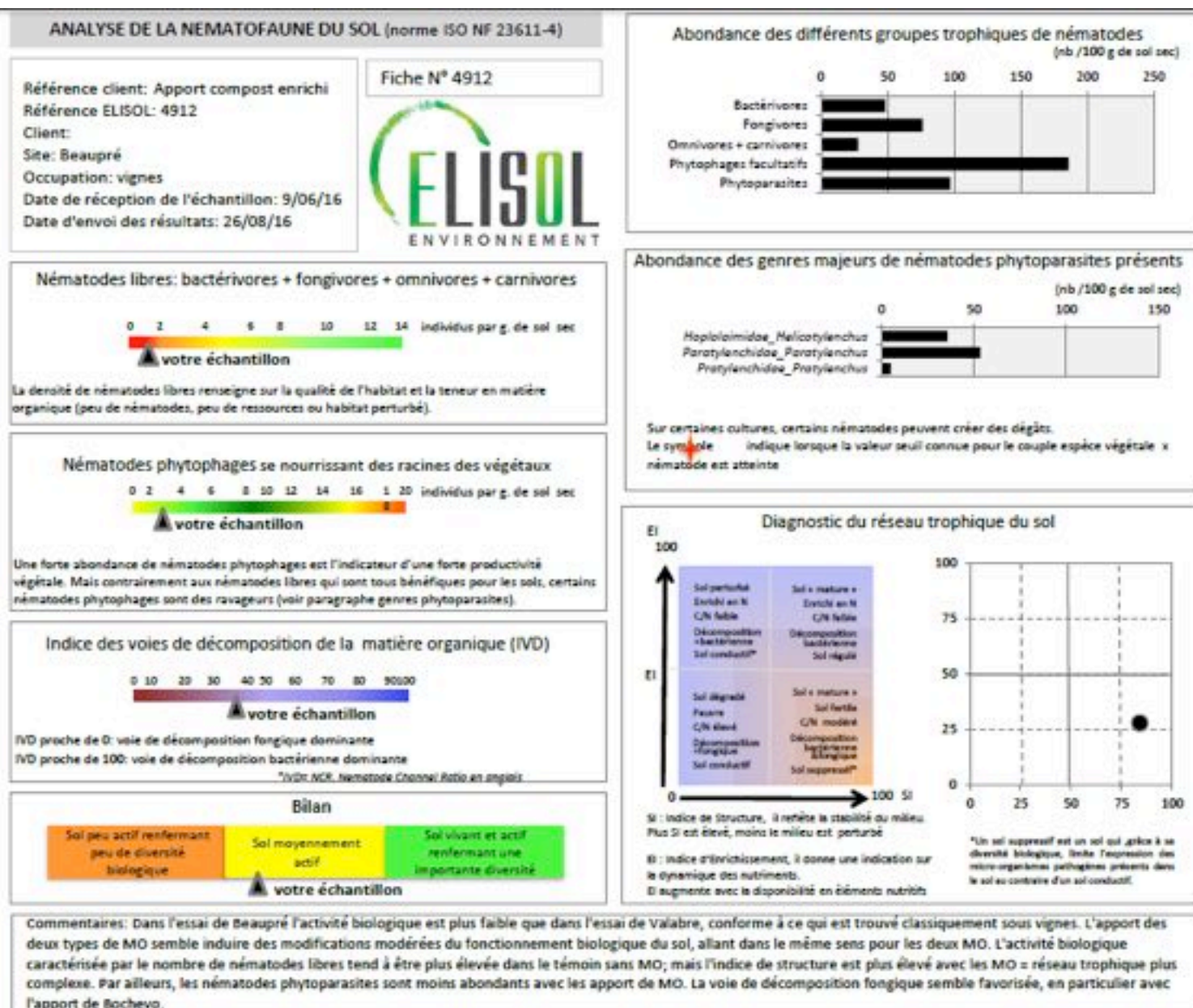
Xavier Salducci
Directeur du Laboratoire

Annexe 14 : Tableau des différents paramètres issus de l'analyse de la nématofaune utilisés pour caractériser le fonctionnement biologique du sol

PARAMETRES	DESCRIPTION	FORMULE ET UNITE
ABONDANCES		
BACTERIENNES_CP1	Abondance des nématodes bactériens cp1 (cp1 valeur 1 sur l'échelle colonisateur-persistant allant de 1 à 5) : ces nématodes opportunistes se reproduisent rapidement et renseignent sur "l'enrichissement du milieu"	
BACTERIENNES_AUTRES	Abondance de nématodes bactériens autres que les cp1 : ces nématodes ont des cycles de vie plus longs	
BACTERIENNES	Abondance de tous les nématodes bactériens (nématodes se nourrissant de bactéries) : renseigne sur le compartiment bactérien du sol	
FONGIENNES	Abondance de nématodes fongicoles (nématodes se nourrissant de champignons) : renseigne sur le compartiment fongique	
OMNI_CARIN	Abondance des nématodes omnivores et carnivores : ces nématodes sont sensibles aux perturbations physiques et chimiques du sol : ils informent sur la stabilité du milieu et le niveau de perturbation	
LIBRES	Abondance des nématodes vivant librement dans le sol (cad non parasites) : bactériens + fongicoles + omnivores + carnivores. Leur abondance est un indicateur du niveau de l'activité biologique du sol	nb individus 100g ⁻¹ de sol sec
PHYTOPARASITES	Abondance des nématodes phytoparasites : ils se nourrissent des racines et peuvent créer des dommages aux plantes qu'ils parasitent	
PHYTO_FALC	Abondance des nématodes phytophages facultatifs : ils se nourrissent des racines, mais ne créent usuellement pas de dégâts : ils peuvent également dans certains contextes se nourrir de champignons du sol	
PHYTOPHAGES	Abondance des nématodes phytophages : ces nématodes se nourrissent sur les racines des végétaux exclusivement ou non : ils renseignent sur l'état de la couverture végétale et les risques de perte de rendement pour les plantes cultivées.	
TOTAL	Abondance totale de nématodes : libres et phytophages	
INDICES NEMATOFUNCIQUES		
EI	Indice d'enrichissement : il donne une indication sur les ressources facilement disponibles dans le sol et sur l'activité des décomposeurs primaires. Il prend en compte en particulier l'abondance relative de la faune d'enrichissement cad des bactériens cp1 et des fongicoles cp2. L'EI augmente avec la disponibilité en nutriments (azote en particulier).	$EI = \frac{EI_{cp1} + EI_{cp2}}{EI_{cp1} + EI_{cp2} + 100}$ (1)
SI	Indice de structure : il donne une information sur la structure du réseau trophique du sol, et renseigne donc sur la stabilité du milieu. Il prend en compte en particulier l'abondance relative de la faune de structure cad des nématodes persistants (nématodes aux cycles de vie long et fragiles). Plus il est élevé, moins le milieu est perturbé, plus le réseau biologique du sol est complexe.	$SI = \frac{SI_{cp1} + SI_{cp2}}{SI_{cp1} + SI_{cp2} + 100}$ (1)
BI	Indice basal : il est basé sur l'abondance relative de la faune basale. Le BI est d'autant plus élevé que les conditions du milieu sont pauvres.	$BI = \frac{BI_{cp1} + BI_{cp2}}{BI_{cp1} + BI_{cp2} + 100}$ (2)
CI	Channel Index : il renseigne sur les voies de décomposition de la matière organique du sol : il est calculé à partir des abondances de fongicoles cp2 (Fuc) et des bactériens cp1 (Ba1). Plus il est faible, plus la voie bactérienne est importante.	$CI = \frac{CI_{cp1} + CI_{cp2}}{CI_{cp1} + CI_{cp2} + 100}$ (2)
NCR	Nematode Channel Ratio : il est calculé à partir des abondances des bactériens (Ba) et des fongicoles (Fu). Comme le CI, il renseigne sur les voies de décomposition de la matière organique du sol : plus il est élevé, plus la voie bactérienne est importante.	$NCR = \frac{NCR_{cp1} + NCR_{cp2}}{NCR_{cp1} + NCR_{cp2} + 100}$ (3)
MI	Indice de maturité : il informe sur la maturité du milieu et sa stabilité. Il est calculé en tenant compte uniquement des nématodes libres (phytoparasites exclus) : plus il est élevé, plus la stabilité est élevée.	$MI = \frac{MI_{cp1} + MI_{cp2}}{MI_{cp1} + MI_{cp2} + 100}$ (4)
PI	Plant Parasitic Index : il s'agit d'un indice de maturité propre aux nématodes phytoparasites. Plus cet indice est élevé, plus le risque pour les cultures peut être important.	$PI = \frac{PI_{cp1} + PI_{cp2}}{PI_{cp1} + PI_{cp2} + 100}$ (4)
INDICES DE DIVERSITE		
R_TAXO_FAM	Richesse taxonomique : nombre de familles de nématodes identifiées dans l'échantillon. Ce paramètre renseigne sur le niveau de diversité patrimoniale. Plus il est élevé, plus la diversité est importante.	
DIV_SHANNON_FAM	L'indice de diversité de Shannon renseigne sur la diversité des familles de nématodes présents en tenant compte également de leur abondance relative. Ce paramètre renseigne sur le niveau de diversité patrimoniale. Plus il est élevé, plus la diversité est importante.	$H' = -\sum p_i \ln p_i$ $P = N / H'$ (3)
EMPREINTES METABOLIQUES		
EFoot	empreinte d'enrichissement	
SFoot	empreinte de structure	
FLFoot	empreinte des phytophages	
BAFoot	empreinte des bactériens	$F = \frac{F_{cp1} + F_{cp2}}{F_{cp1} + F_{cp2} + 100}$
FUNFoot	empreinte des fongicoles	
COMFoot	empreinte de la communauté	$IGC = \frac{IGC_{cp1} + IGC_{cp2}}{IGC_{cp1} + IGC_{cp2} + 100}$ (5)

(1) Ka, Kb, Kc : coefficients relatifs respectivement aux différents familles des indicateurs d'enrichissement, faune basale et indicateur de structure ; n : abondance des familles considérées ; (2) Fuc2 : nombre de fongicoles cp2 ; Ba1 : nombre de bactériens cp1 ; (3) Ba1 : nombre de bactériens cp1 ; Fu2 : nombre de fongicoles cp2 ; (4) VI : valeur cp ; PI : proportion des nématodes de classe cp considérée ; (5) N : abondance totale des nématodes ; NI : abondance de la famille i ; MI : poids moyen d'un nématode de la famille i ; VI : valeur cp de la famille i

Annexe 15: Exemple d'analyse de la nématofaune du sol par Elisol Environnement pour la parcelle du site de Beaupré traité avec du compost enrichi

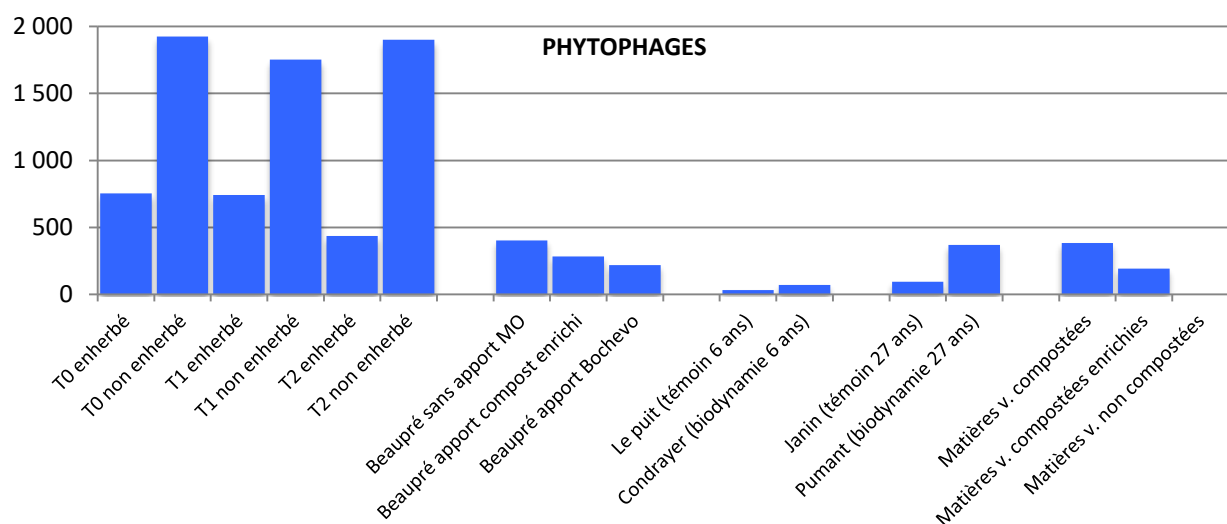
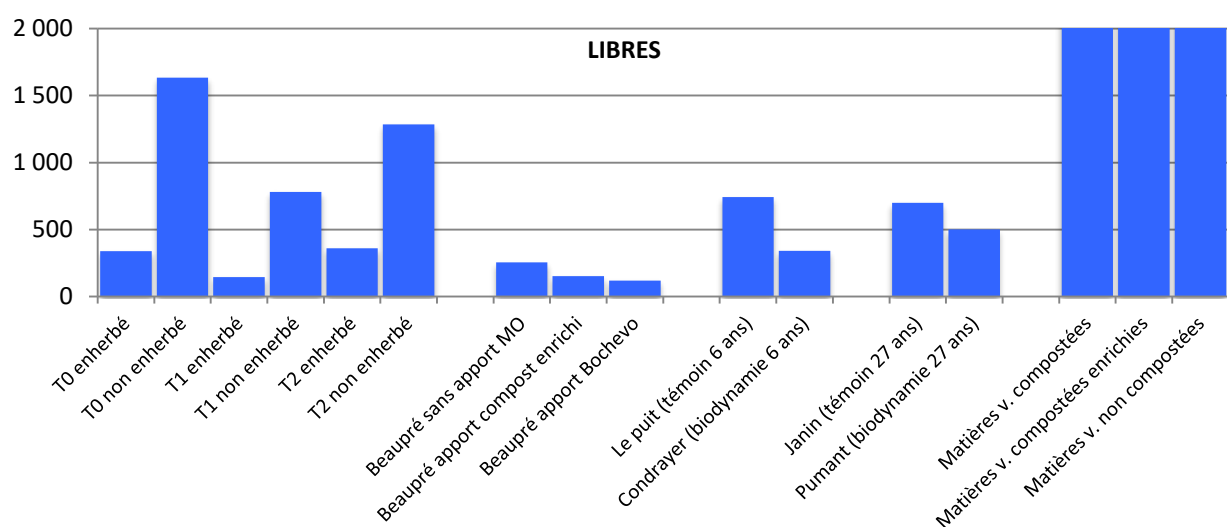
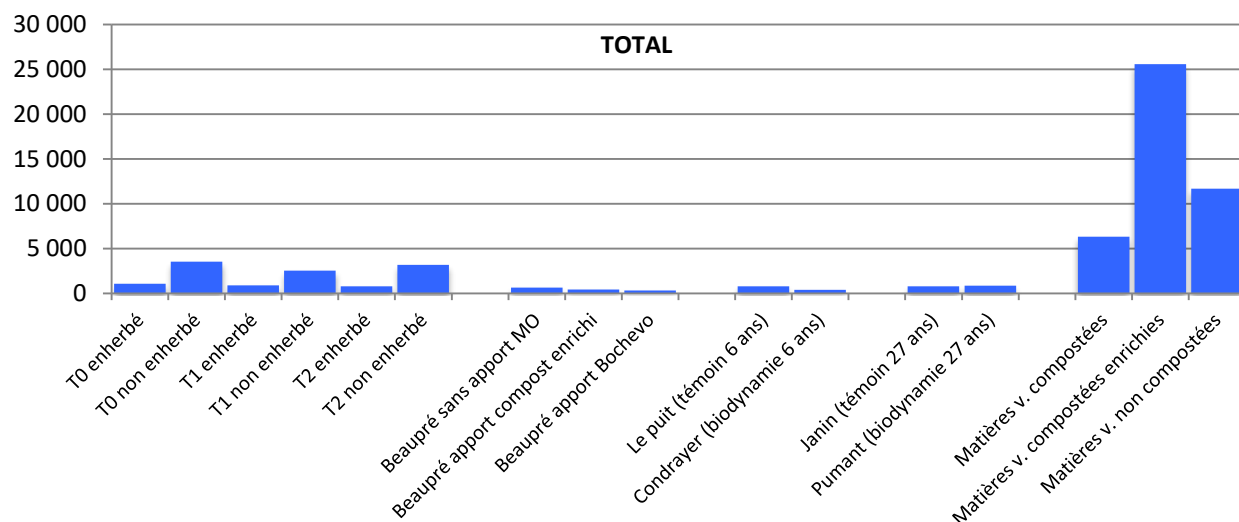


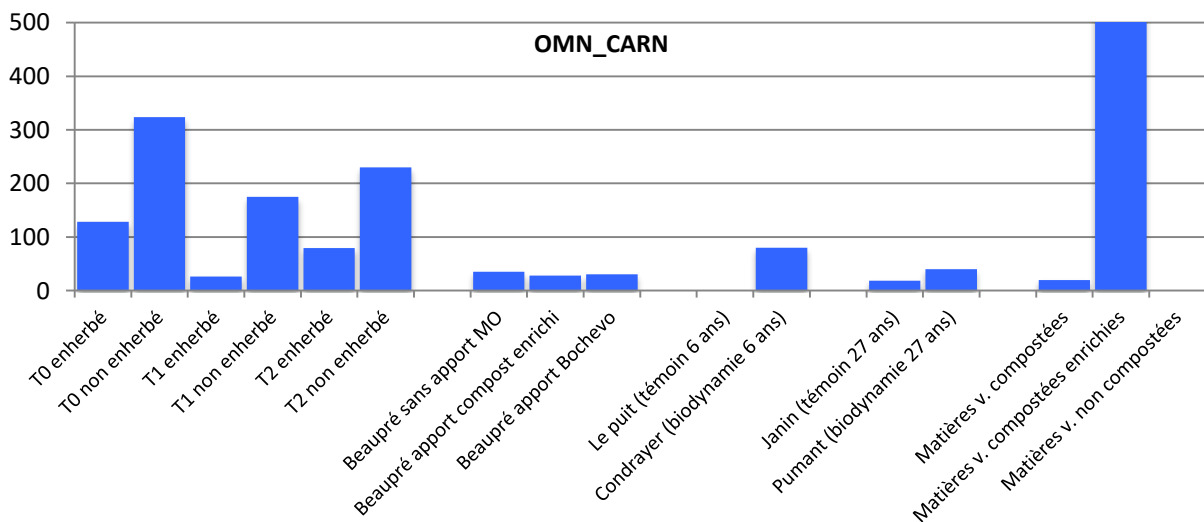
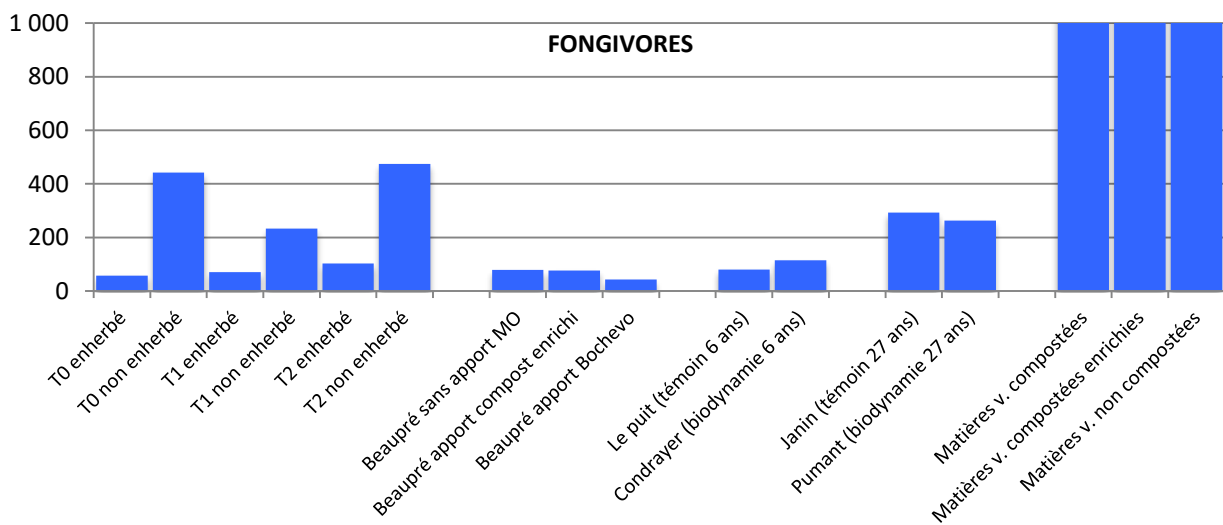
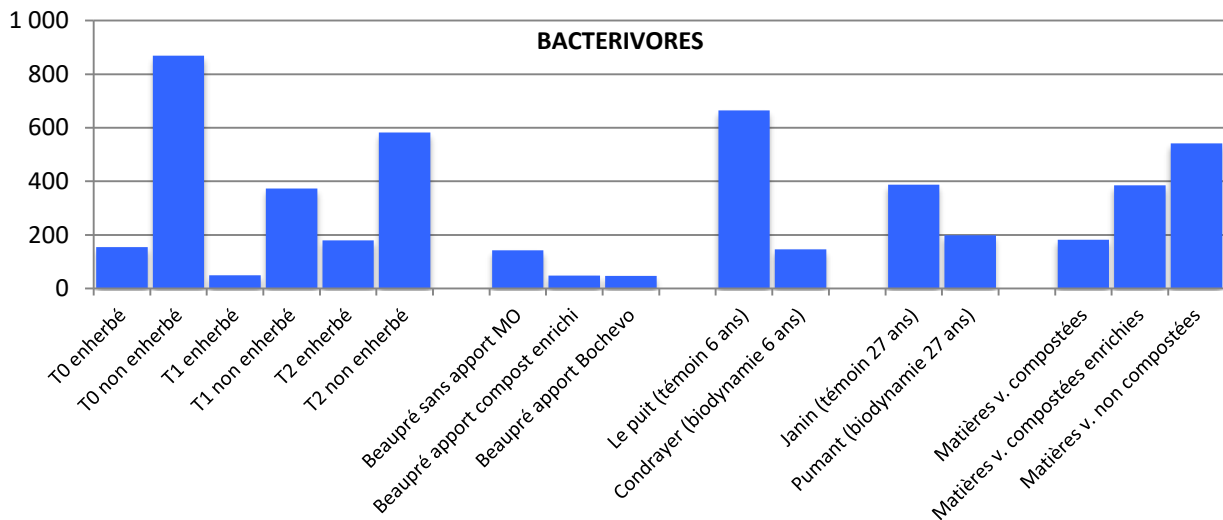
Annexe 16 : Données Elisol Environnement des trois sites expérimentaux de Valabre, Beaupré, Vallon des Borrels

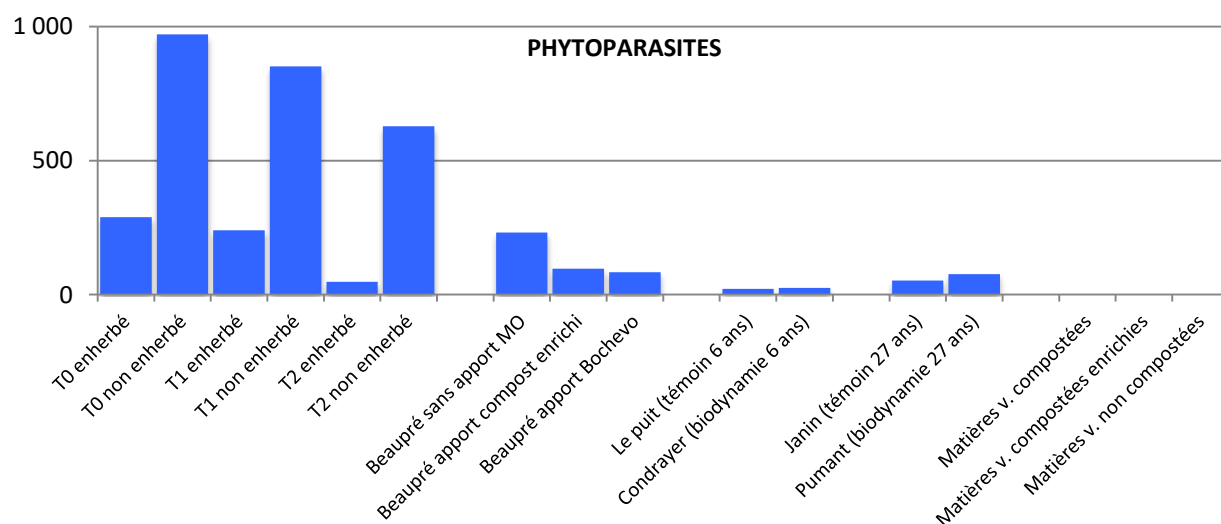
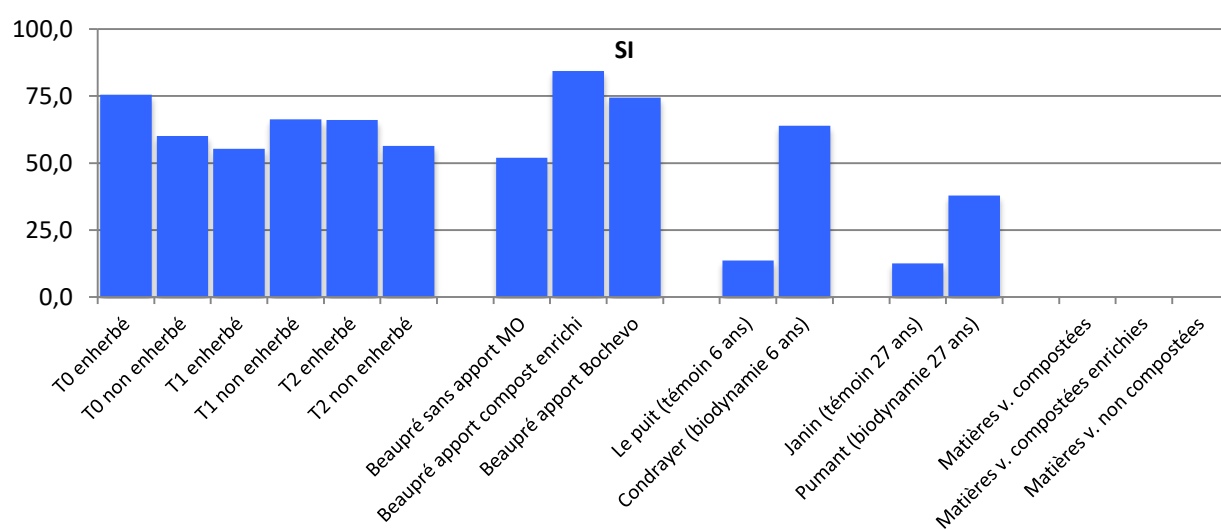
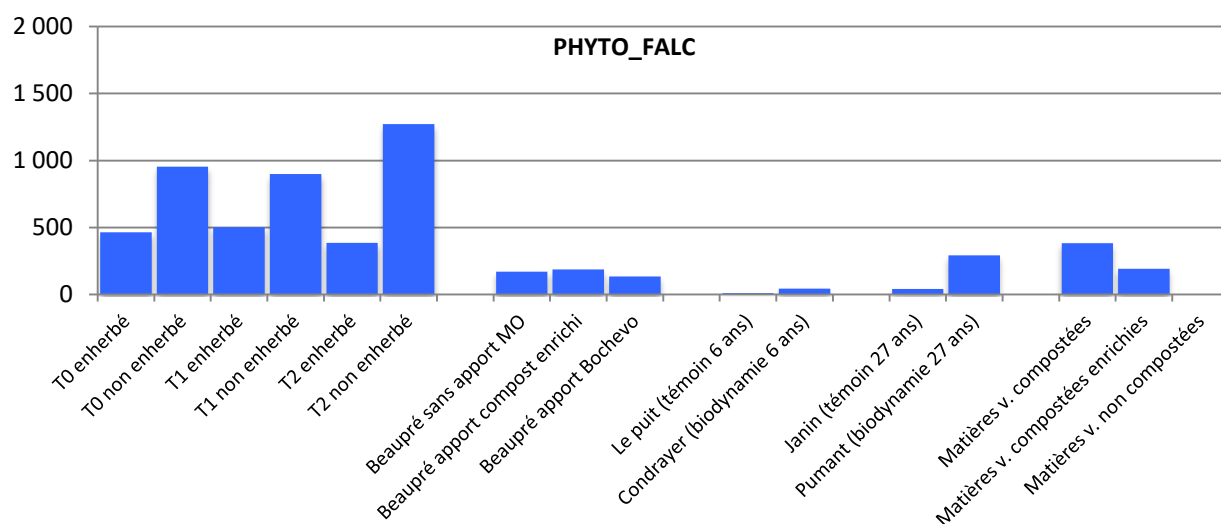
	Abondance des différents types de nématodes (ind 100 g-1 sol sec)							
MODALITE	TOTAL	LIBRES	PHYTOPHAGES	BACTERIVORES	FONGIVORES	OMNICAERN	PHYTOFALC	PHYTOPARASITES
T0 enherbé	1 095	341	753	155	58	129	464	290
T0 non enherbé	3 560	1 635	1 925	869	443	324	954	971
T1 enherbé	889	147	743	49	71	27	502	240
T1 non enherbé	2 533	782	1 751	374	233	175	899	852
T2 enherbé	797	363	435	179	104	80	387	48
T2 non enherbé	3 187	1 287	1 900	582	475	230	1 272	628
Beaupré sans apport MO	659	256	402	142	79	36	170	233
Beaupré apport compost enrichi	437	153	283	49	77	28	186	97
Beaupré apport Bochevo	340	121	219	47	43	31	135	84
Le puit (témoin 6 ans)	776	745	31	664	81	0	10	21
Condrayer (biodynamie 6 ans)	412	341	71	146	115	80	45	26
Janin (témoin 27 ans)	794	700	94	388	293	19	41	53
Pumant (biodynamie 27 ans)	870	502	368	198	263	40	291	77
Matières v. compostées	6 346	5 962	384	182	5 760	20	384	0
Matières v. compostées enrichies	25 597	25 404	192	385	24 346	674	192	0
Matières v. non compostées	11 678	11 678	0	542	11 136	0	0	0

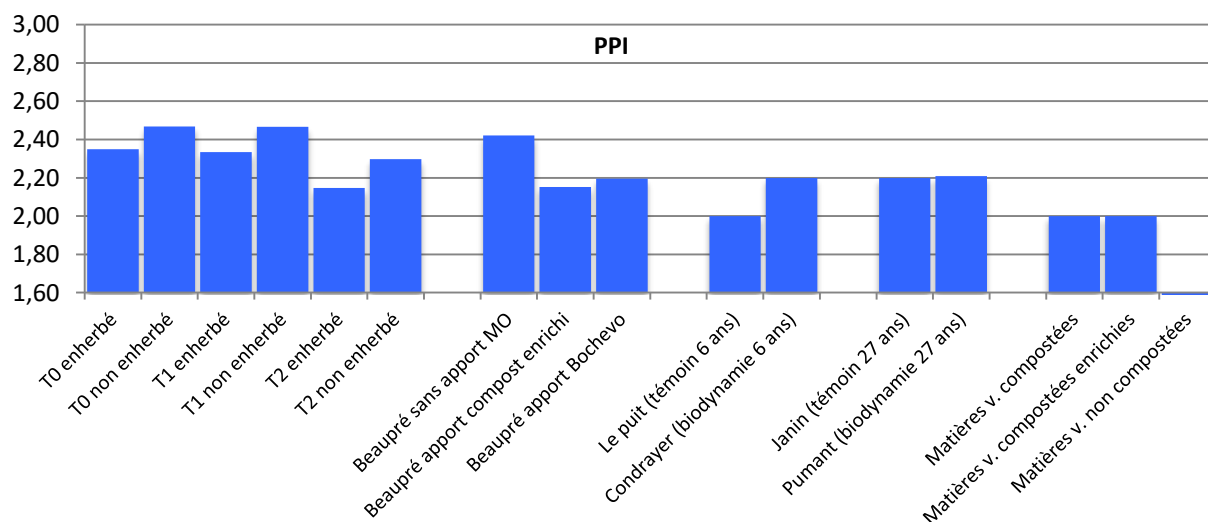
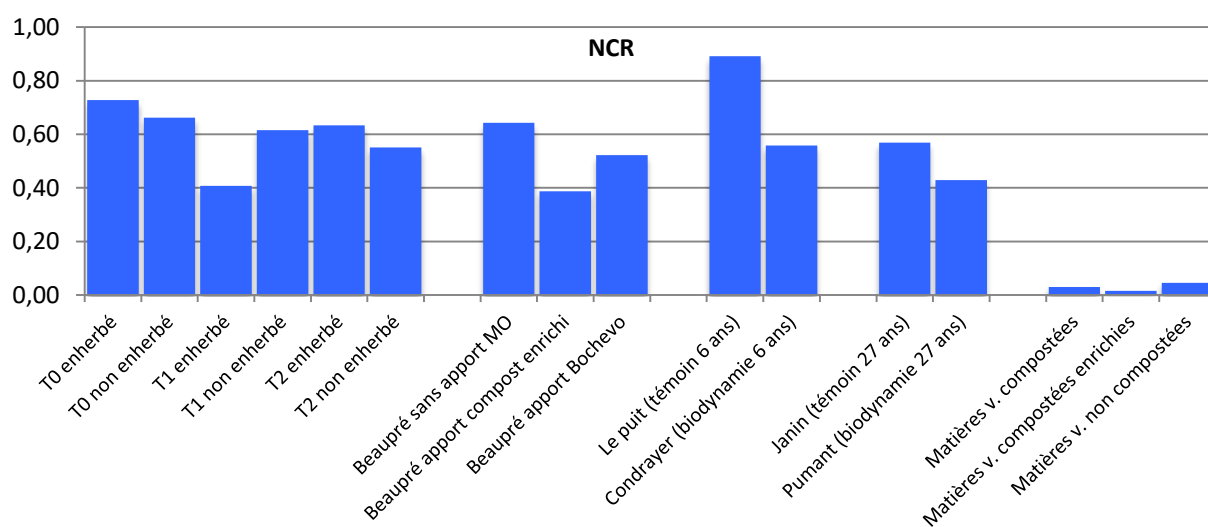
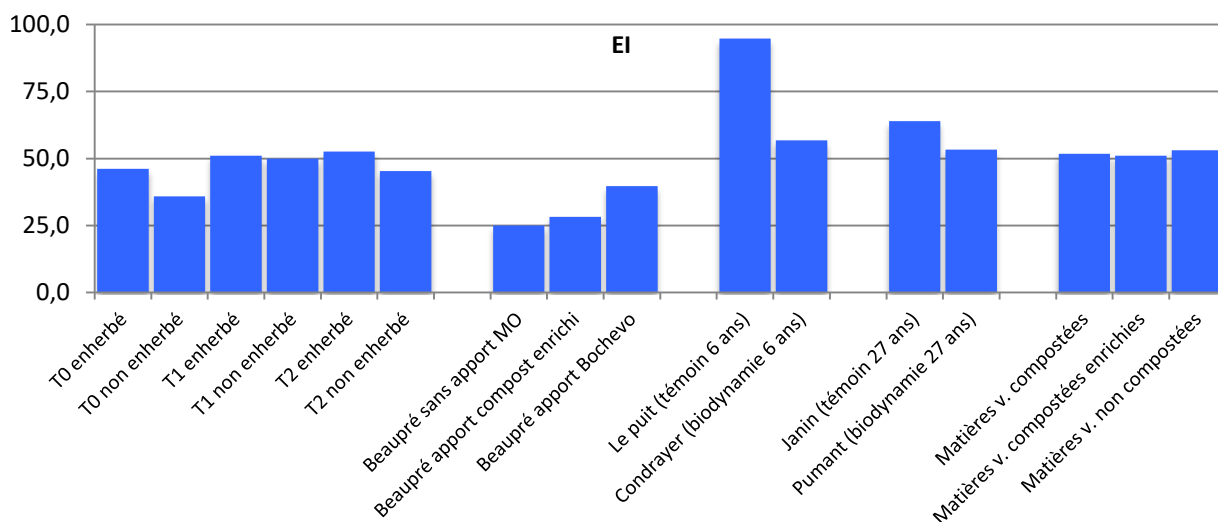
	Indices nématofauniques (sans unité)					Richesse taxonomique	Indice de Shannon
MODALIT E	SI (Indice de structure)	EI (Indice d'enrichissement)	IVD (Indice des voies de décomposition)	PPI (Indice nématodes phytophages)	MI (Indice de maturité)	R_TAXO_FAM	DIV_SHANNON_FAM
T0 enherbé	75,5	46,2	0,73	2,35	2,74	19	2,07
T0 non enherbé	60,2	35,9	0,66	2,47	2,47	20	2,29
T1 enherbé	55,3	51,1	0,41	2,34	2,36	12	1,44
T1 non enherbé	66,4	50,0	0,62	2,47	2,51	18	2,03
T2 enherbé	66,1	52,5	0,63	2,15	2,48	18	1,91
T2 non enherbé	56,5	45,3	0,55	2,30	2,38	16	2,03
Beaupré sans apport MO	52,0	25,0	0,6	2,4	2,4	16	2,1
Beaupré apport compost enrichi	84,3	28,2	0,4	2,2	3,2	13	1,9
Beaupré apport Bochevo	74,5	39,7	0,5	2,2	2,8	15	2,0
Le puit (témoin 6 ans)	13,6	94,8	0,9	2,0	1,2	12	1,0
Condrayer (biodynamie 6 ans)	63,9	56,7	0,6	2,2	2,4	14	2,2
Janin (témoin 27 ans)	12,6	63,9	0,6	2,2	1,8	11	2,0
Pumant (biodynamie 27 ans)	37,9	53,4	0,4	2,2	2,1	17	2,1
Matières v. compostées	0,0	51,8	0,0	2,0	2,0	7	1,0
Matières v. compostées enrichies	0,0	51,1	0,0	2,0	2,0	6	0,5
Matières v. non compostées	0,0	53,1	0,0	0,0	2,0	3	0,2

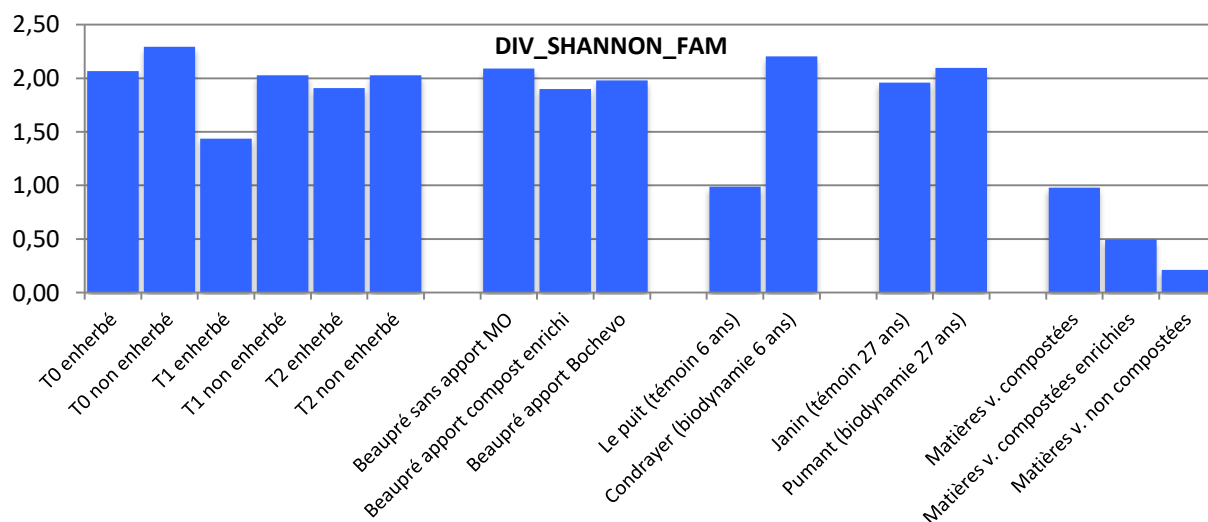
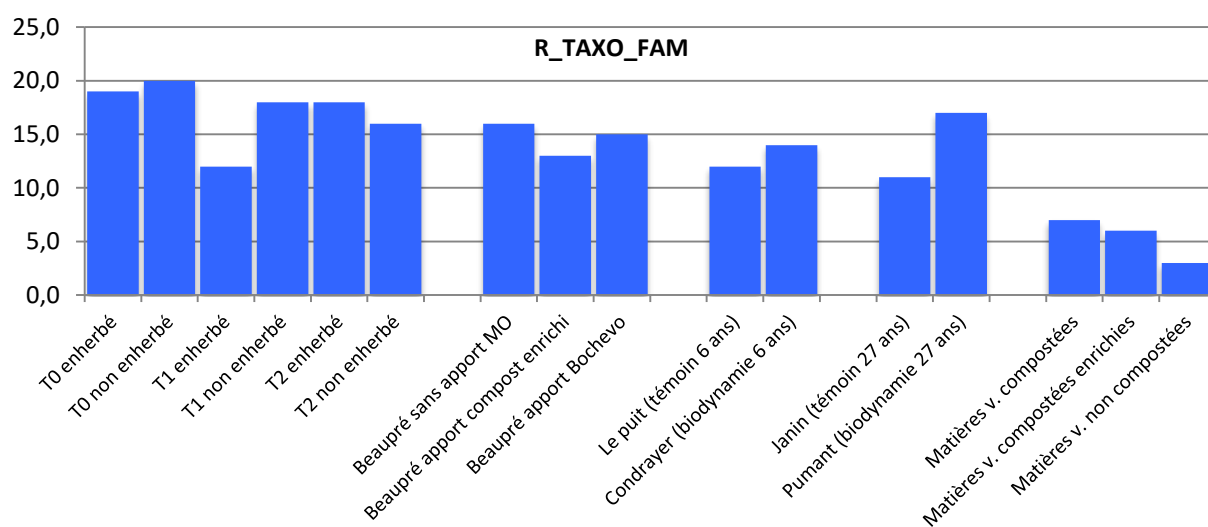
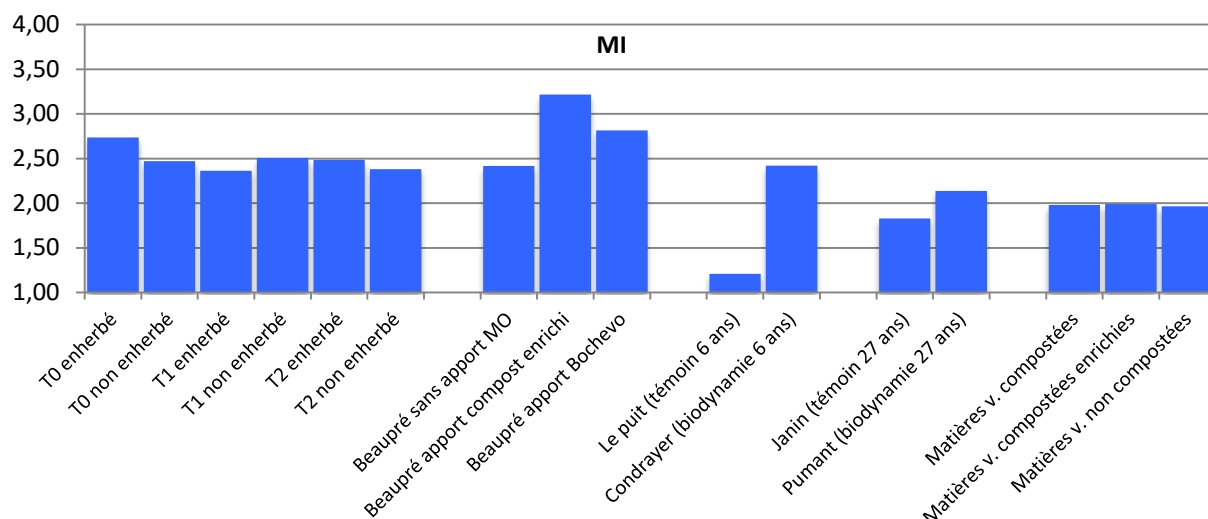
	Empreintes métaboliques (µg C g ⁻¹ sol sec)					
MODALITE	EFOOT	SFOOT	PLTFOOT	BACFOOT	FUNGFOOT	COMFOOT
T0 enherbé	27	103	114	44	8	266
T0 non enherbé	163	426	224	248	58	930
T1 enherbé	24	14	105	22	7	148
T1 non enherbé	135	235	207	157	32	618
T2 enherbé	54	134	88	66	14	297
T2 non enherbé	186	151	193	215	57	596
Beaupré sans apport MO	7	27	119	22	13	173
Beaupré apport compost enrichi	3	40	23	7	28	72
Beaupré apport Bochevo	8	43	19	11	10	77
Le puit (témoin 6 ans)	1 102	1	1	1 104	8	1 114
Condrayer (biodynamie 6 ans)	32	103	6	36	14	156
Janin (témoin 27 ans)	277	10	7	281	31	328
Pumant (biodynamie 27 ans)	64	66	33	60	29	184
Matières v. compostées	795	2	28	202	602	834
Matières v. compostées enrichies	3 158	64	14	542	2 630	3 251
Matières v. non compostées	1 803	0	0	763	1 060	1 823

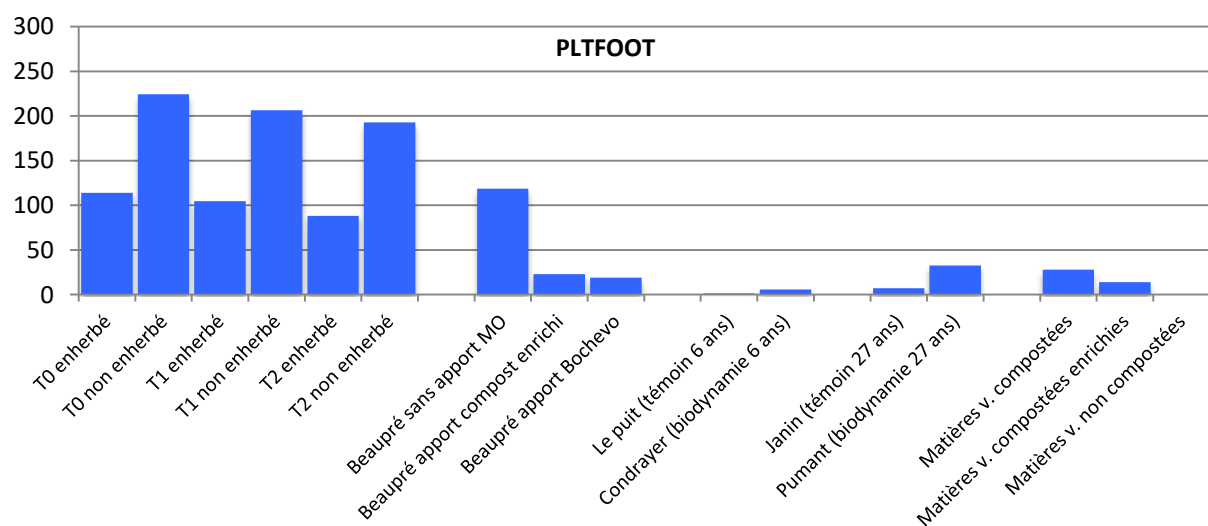
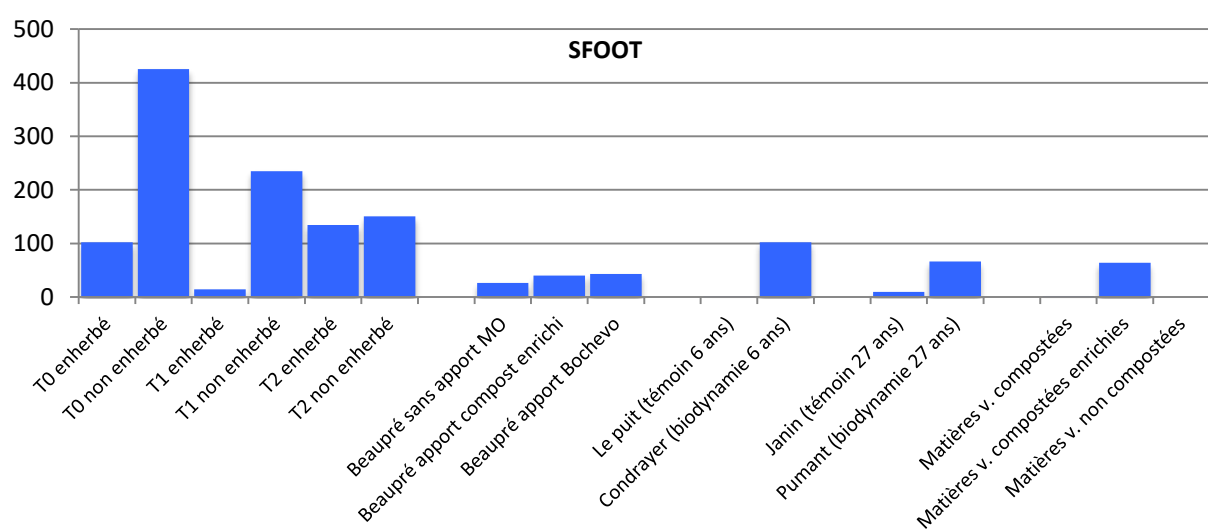
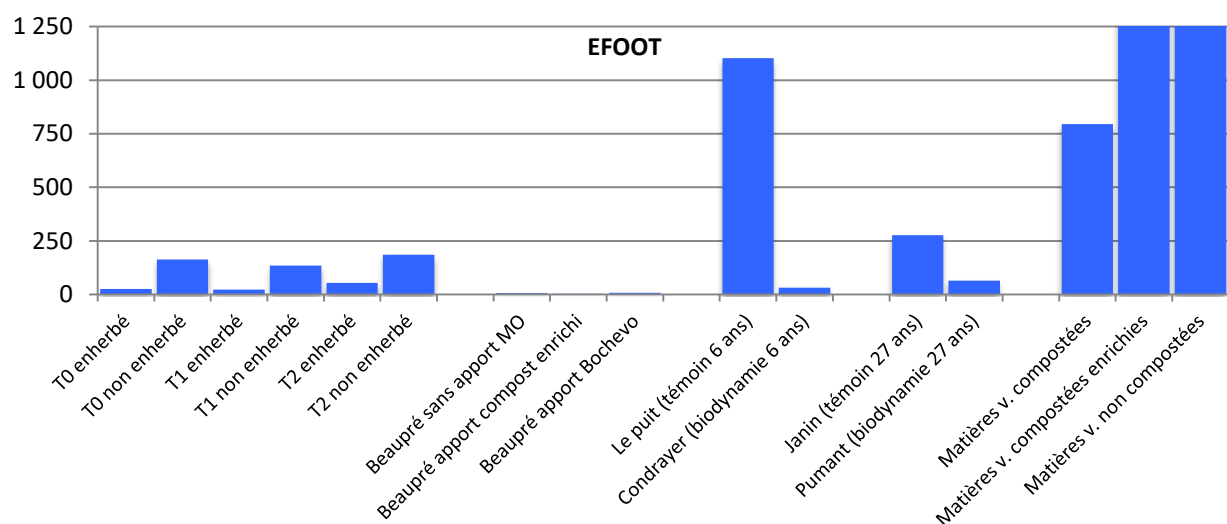


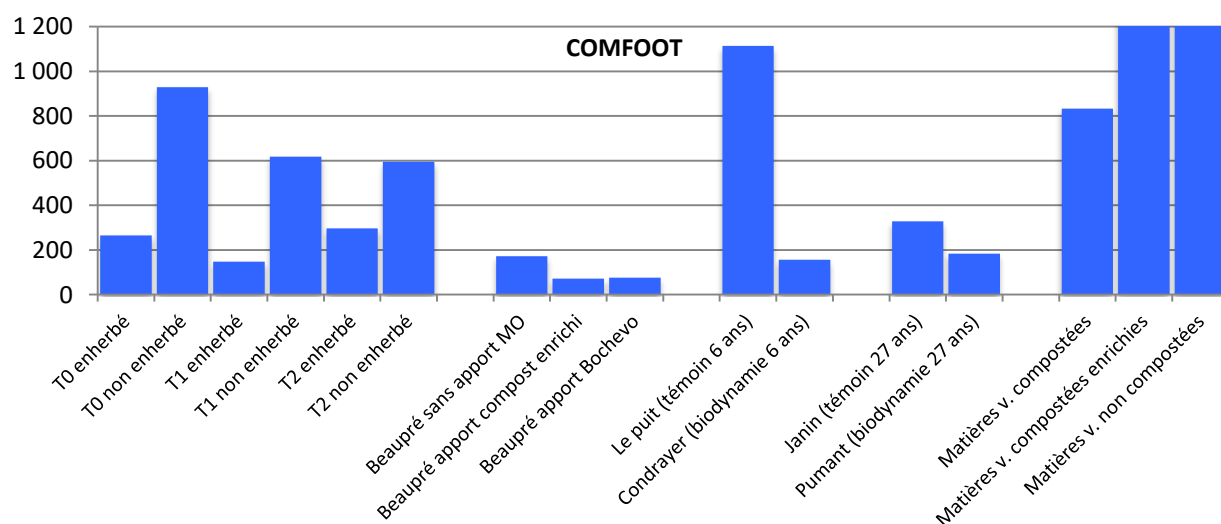
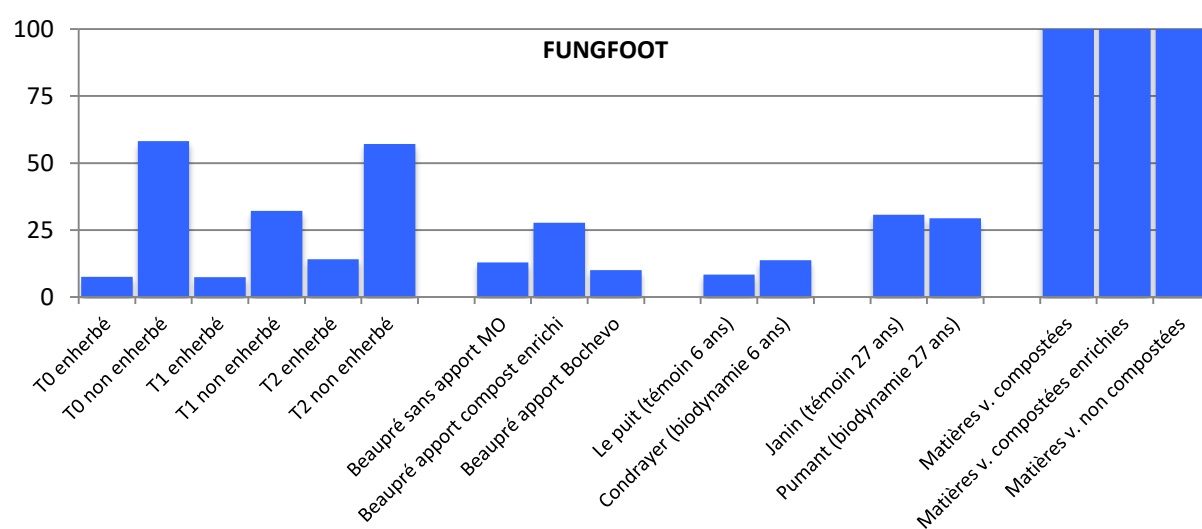
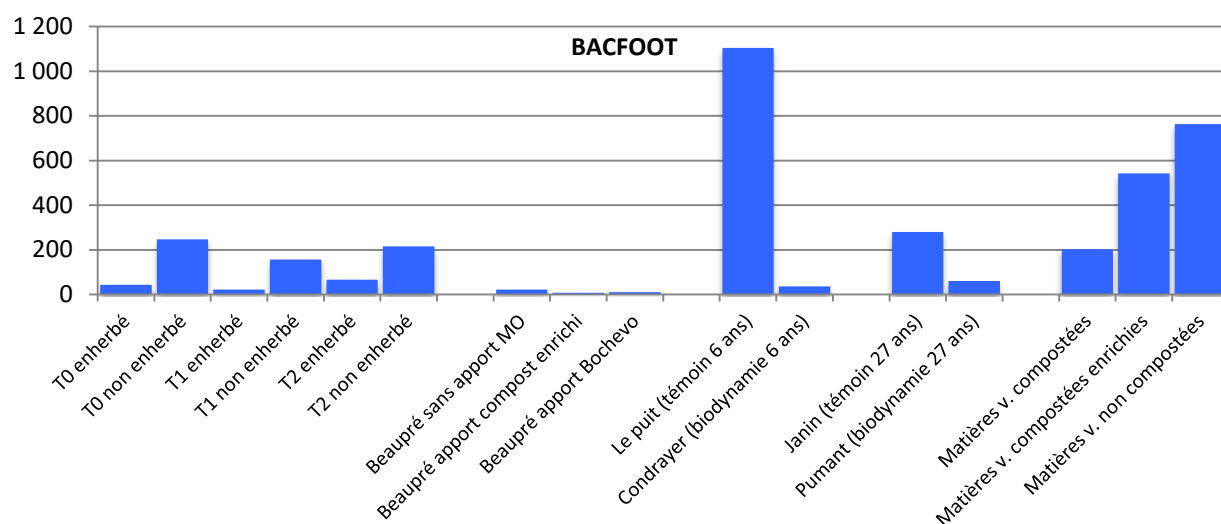










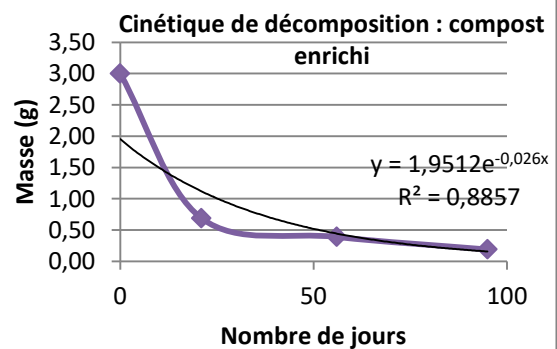
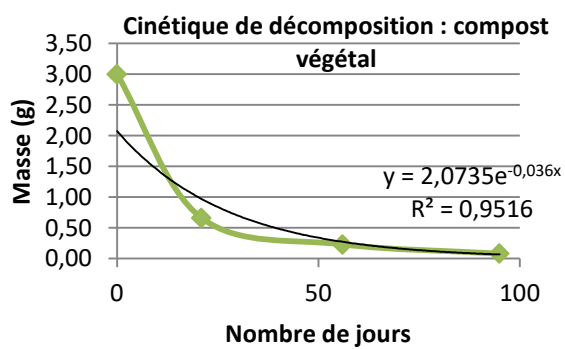
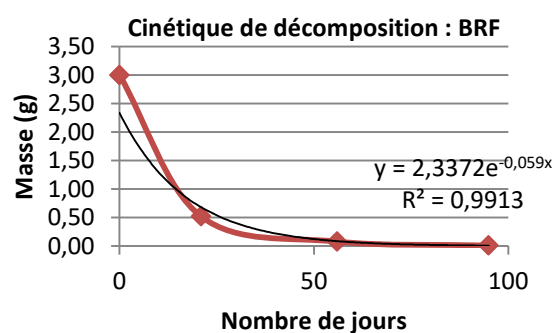
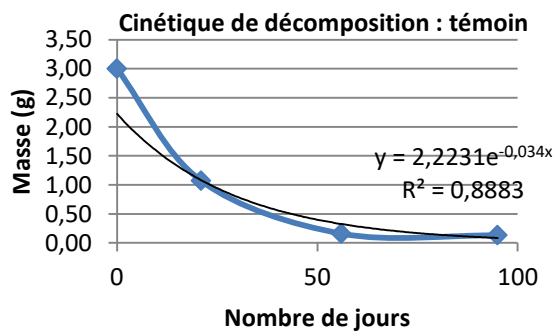
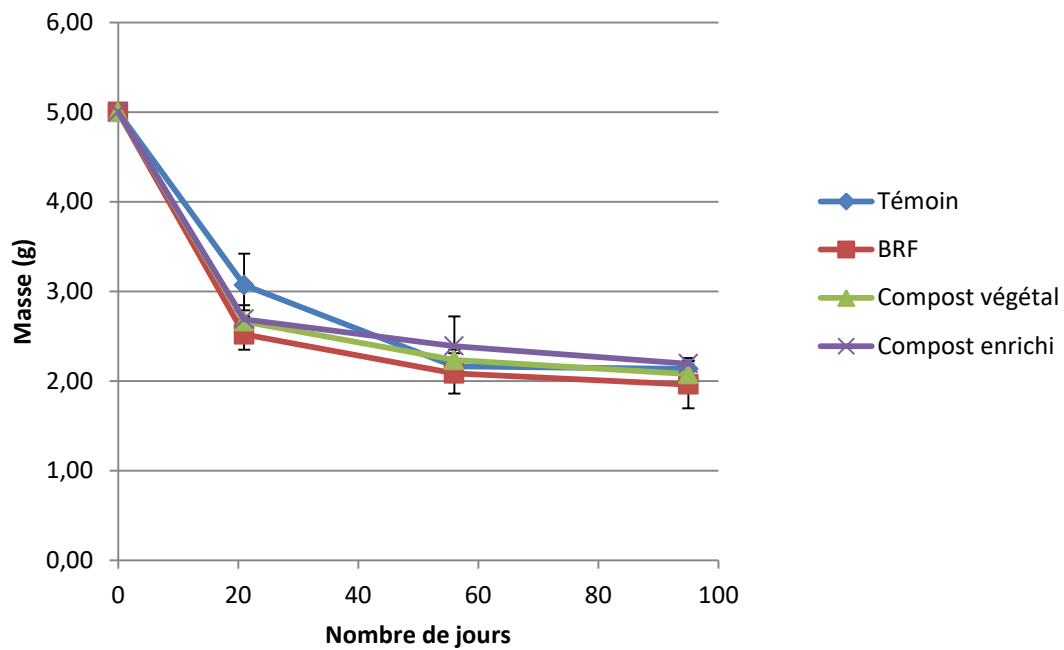


Annexe 17 : Données et graphiques relatifs à l'indicateur Litterbag

Site expérimental de Valabre

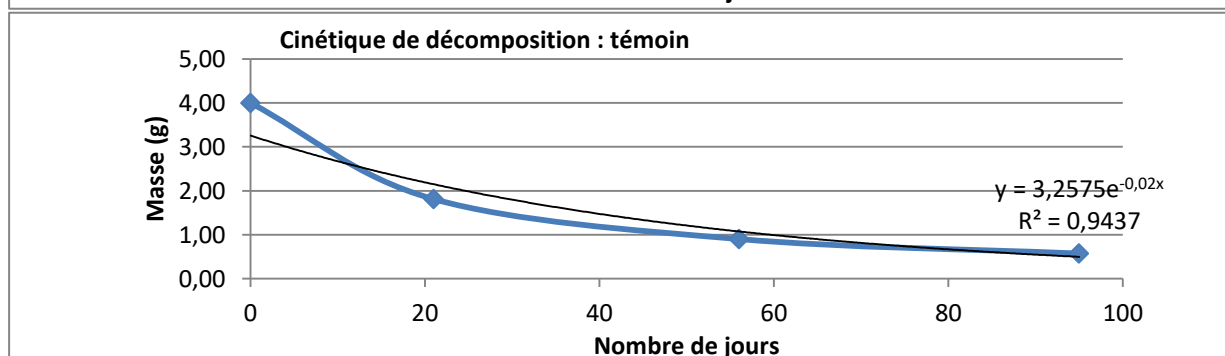
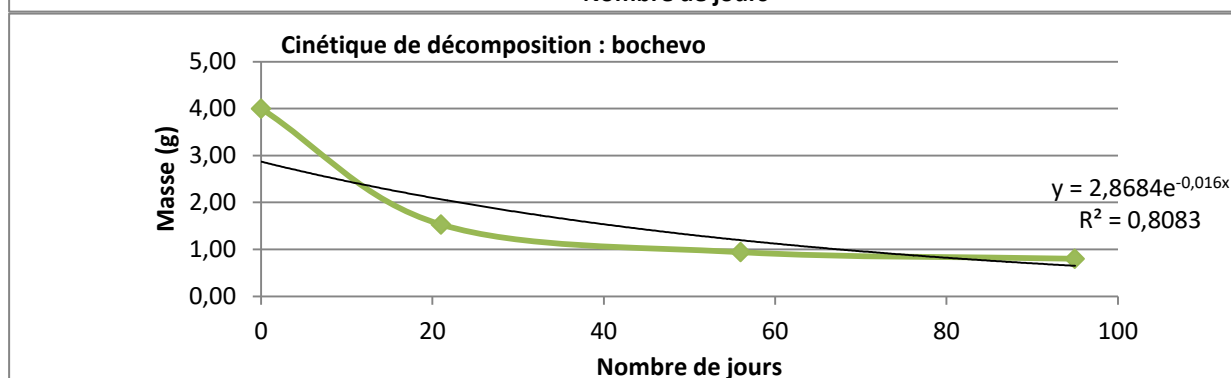
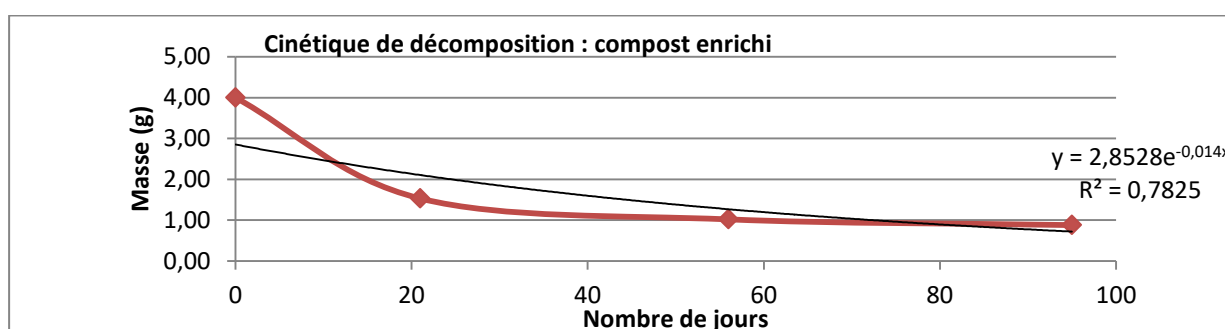
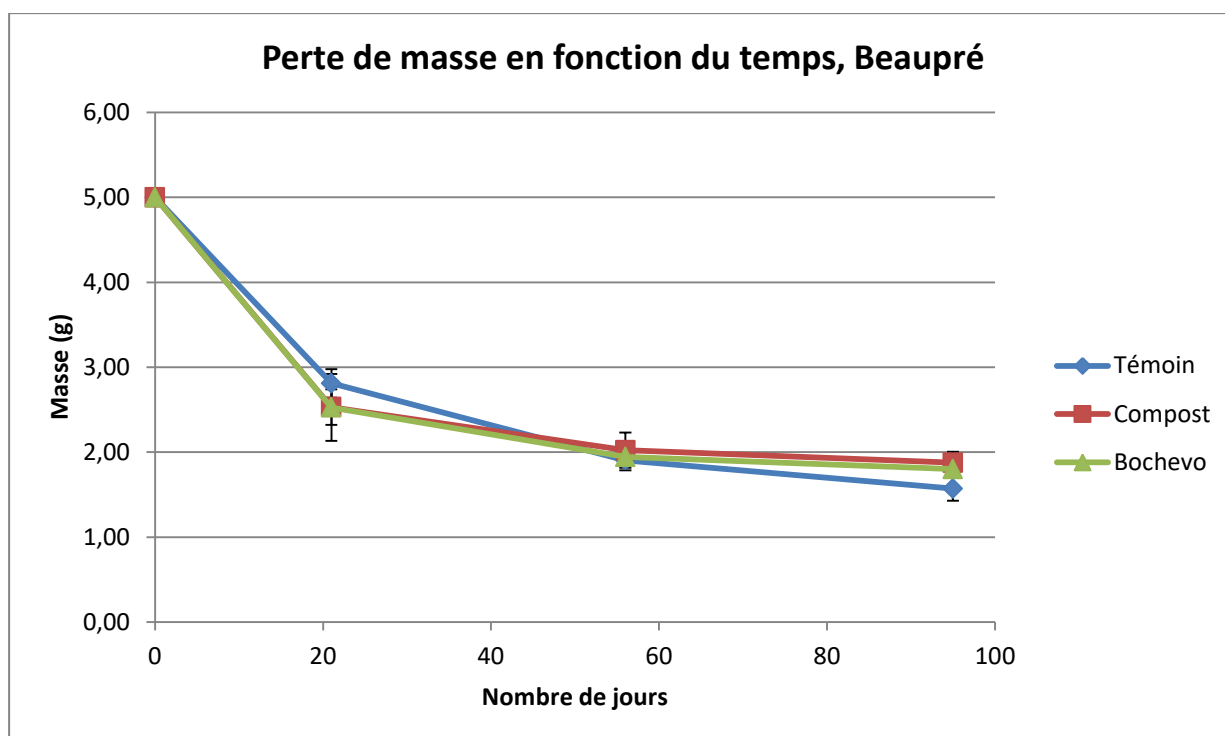
Modalité	Date de mise en terre	Date de récolte	Poids de la matière sèche finale (g)	Moyenne	Ecart-type
T1	17-mai	07-juin	2,40	2,52	0,17
T1	17-mai	07-juin	2,64		
T1	17-mai	07-juin			
T1	17-mai	08-juil	1,89	2,08	0,22
T1	17-mai	08-juil	2,33		
T1	17-mai	08-juil	2,03		
T1	17-mai	16-août	1,71	1,96	0,27
T1	17-mai	16-août	1,93		
T1	17-mai	16-août	2,24		
T0	17-mai	07-juin	2,68	3,07	0,35
T0	17-mai	07-juin	3,17		
T0	17-mai	07-juin	3,36		
T0	17-mai	08-juil	2,20	2,16	0,05
T0	17-mai	08-juil	2,18		
T0	17-mai	08-juil	2,11		
T0	17-mai	16-août	2,21	2,13	0,09
T0	17-mai	16-août	2,15		
T0	17-mai	16-août	2,04		
T2	17-mai	07-juin	2,73	2,66	0,12
T2	17-mai	07-juin	2,74		
T2	17-mai	07-juin	2,52		
T2	17-mai	08-juil	2,35	2,23	0,12
T2	17-mai	08-juil	2,12		
T2	17-mai	08-juil	2,23		
T2	17-mai	16-août	2,20	2,08	0,11
T2	17-mai	16-août	1,99		
T2	17-mai	16-août	2,04		
T3	17-mai	07-juin	2,60	2,69	0,16
T3	17-mai	07-juin	2,87		
T3	17-mai	07-juin	2,60		
T3	17-mai	08-juil	2,77	2,39	0,33
T3	17-mai	08-juil	2,22		
T3	17-mai	08-juil	2,18		
T3	17-mai	16-août	2,22	2,19	0,06
T3	17-mai	16-août	2,12		
T3	17-mai	16-août	2,24		

Evolution de la masse en fonction du temps, Valabre



Site expérimental de Beaupré

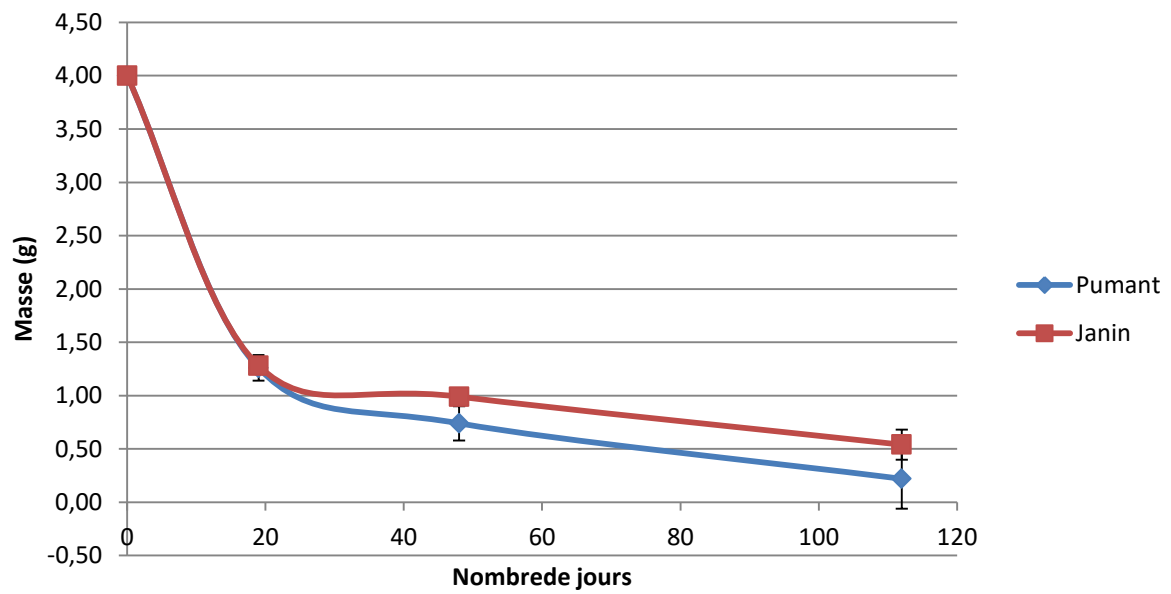
Modalité	Date de mise en terre	Date de récolte	Poids de matière sèche finale (g)	Moyenne	Ecart-type
T0	13-mai	03-juin	2,93	2,81	0,17
T0	13-mai	03-juin	2,88		
T0	13-mai	03-juin	2,62		
T0	13-mai	08-juil	1,98	1,90	0,12
T0	13-mai	08-juil	1,77		
T0	13-mai	08-juil	1,96		
T0	13-mai	16-août	1,67	1,57	0,14
T0	13-mai	16-août	-		
T0	13-mai	16-août	1,47		
Compost enrichi	13-mai	03-juin	2,44	2,53	0,21
Compost enrichi	13-mai	03-juin	2,77		
Compost enrichi	13-mai	03-juin	2,38		
Compost enrichi	13-mai	08-juil	2	2,02	0,21
Compost enrichi	13-mai	08-juil	1,83		
Compost enrichi	13-mai	08-juil	2,24		
Compost enrichi	13-mai	16-août	1,92	1,88	0,05
Compost enrichi	13-mai	16-août	1,88		
Compost enrichi	13-mai	16-août	1,83		
Bochevo	13-mai	03-juin	2,98	2,53	0,39
Bochevo	13-mai	03-juin	2,31		
Bochevo	13-mai	03-juin	2,29		
Bochevo	13-mai	08-juil	1,97	1,94	0,05
Bochevo	13-mai	08-juil	1,97		
Bochevo	13-mai	08-juil	1,89		
Bochevo	13-mai	16-août	1,83	1,80	0,21
Bochevo	13-mai	16-août	1,58		
Bochevo	13-mai	16-août	1,99		



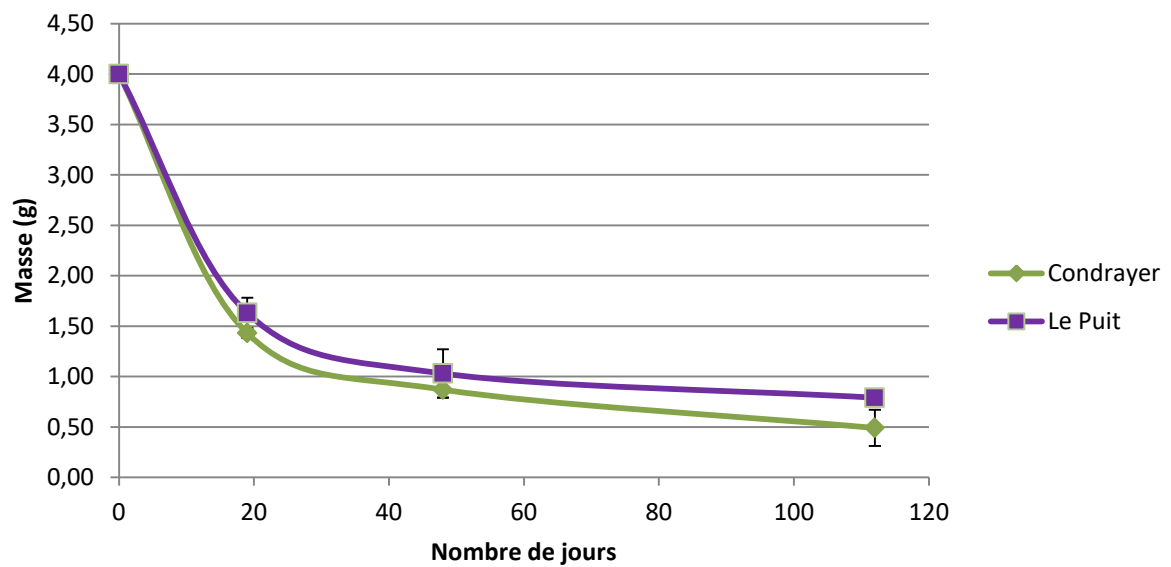
Site expérimental du Vallon des Borrels

Modalité	Date de mise en terre	Date de récolte	Poids de la matière sèche finale (g)	Moyenne (g)	Ecart-type
Pumant	08-juin	27-juin	2,4	2,26	0,12
Pumant	08-juin	27-juin	2,22		
Pumant	08-juin	27-juin	2,17		
Pumant	08-juin	26-juil	1,88	1,74	0,16
Pumant	08-juin	26-juil	1,77		
Pumant	08-juin	26-juil	1,57		
Pumant	08-juin	03-oct	1,42	1,22	0,28
Pumant	08-juin	03-oct	1,33		
Pumant	08-juin	03-oct	0,9		
Janin	08-juin	27-juin	2,28	2,28	0,01
Janin	08-juin	27-juin	2,29		
Janin	08-juin	27-juin	2,28		
Janin	08-juin	26-juil	1,91	1,99	0,08
Janin	08-juin	26-juil	2,07		
Janin	08-juin	26-juil	1,98		
Janin	08-juin	03-oct	1,7	1,54	0,14
Janin	08-juin	03-oct	1,44		
Janin	08-juin	03-oct	1,48		
Condroyer	08-juin	27-juin	2,46	2,43	0,05
Condroyer	08-juin	27-juin	2,38		
Condroyer	08-juin	27-juin	2,46		
Condroyer	08-juin	26-juil	1,95	1,87	0,08
Condroyer	08-juin	26-juil	1,86		
Condroyer	08-juin	26-juil	1,8		
Condroyer	08-juin	03-oct	1,45	1,49	0,18
Condroyer	08-juin	03-oct	1,68		
Condroyer	08-juin	03-oct	1,33		
Le Puit	08-juin	27-juin	2,47	2,63	0,15
Le Puit	08-juin	27-juin	2,76		
Le Puit	08-juin	27-juin	2,67		
Le Puit	08-juin	26-juil	2,27	2,03	0,24
Le Puit	08-juin	26-juil	2,01		
Le Puit	08-juin	26-juil	1,8		
Le Puit	08-juin	03-oct	1,8	1,79	0,04
Le Puit	08-juin	03-oct	1,82		
Le Puit	08-juin	03-oct	1,74		

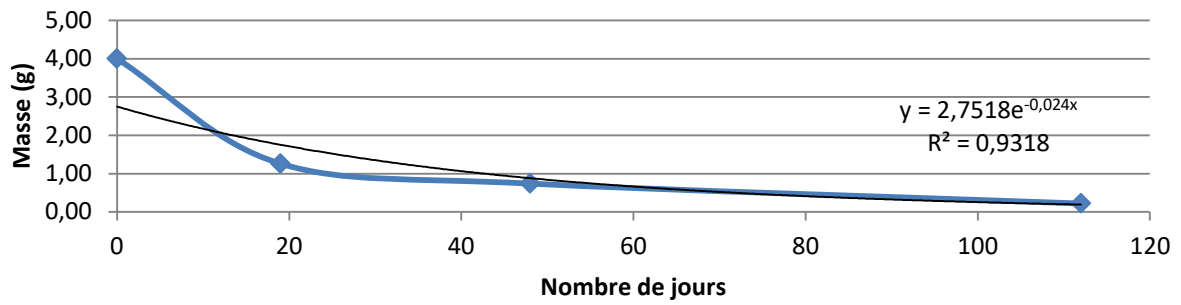
Cinétique de décomposition : Les Fouques 1



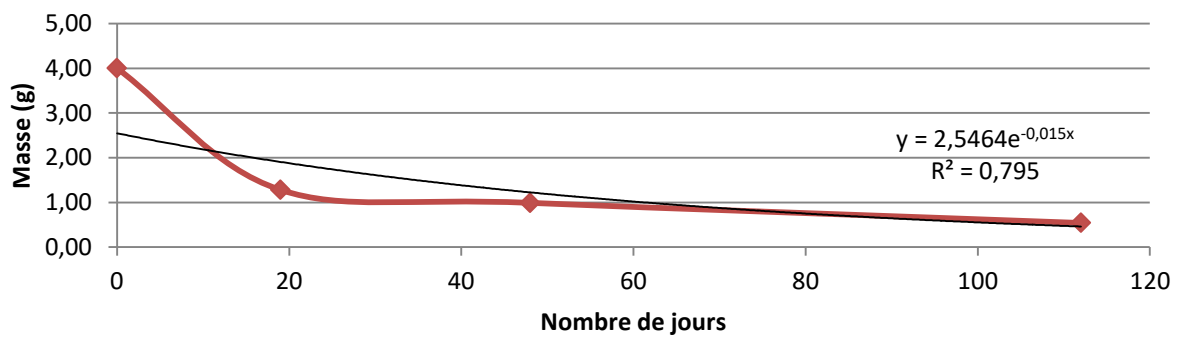
Cinétique de décomposition : Les Fouques 2



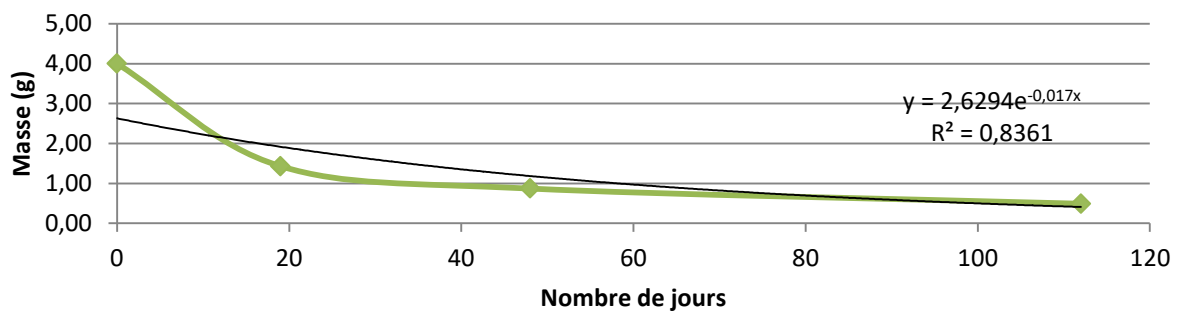
Cinétique de décomposition : Pumant



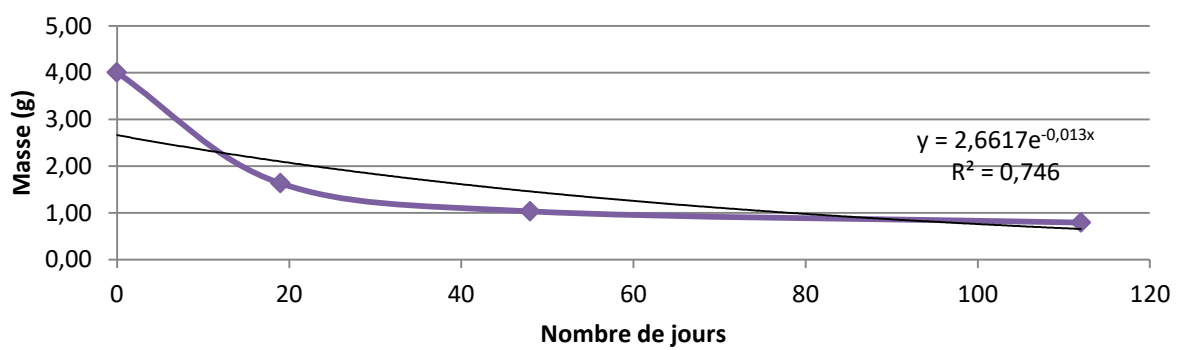
Cinétique de décomposition : Janin



Cinétique de décomposition : Condrayer



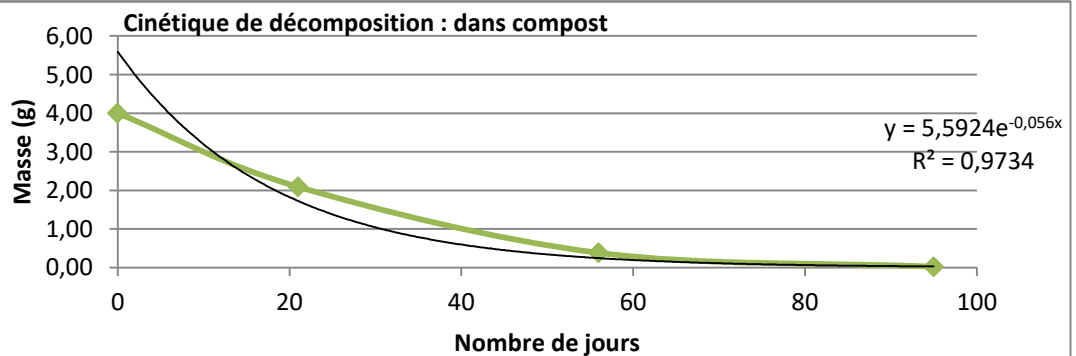
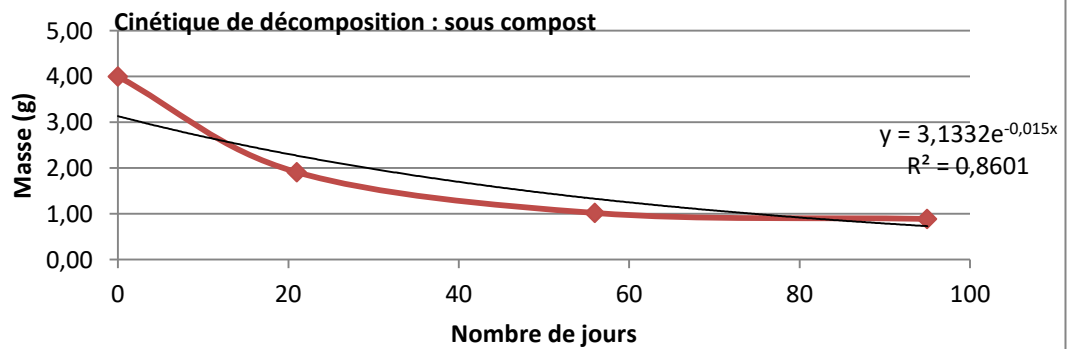
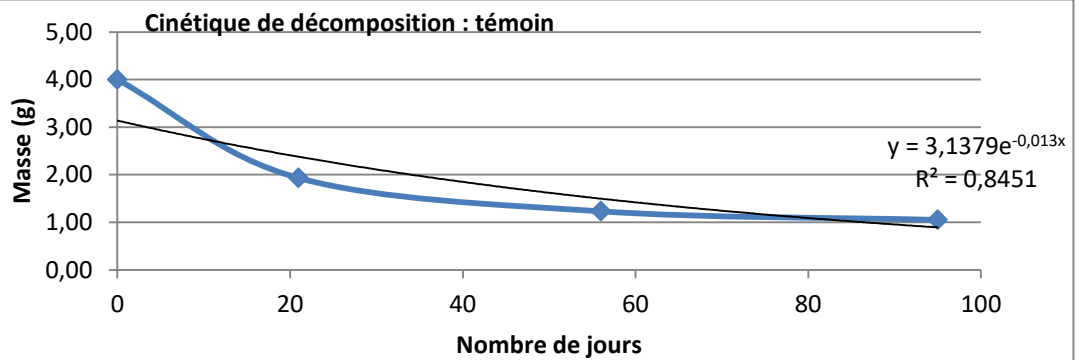
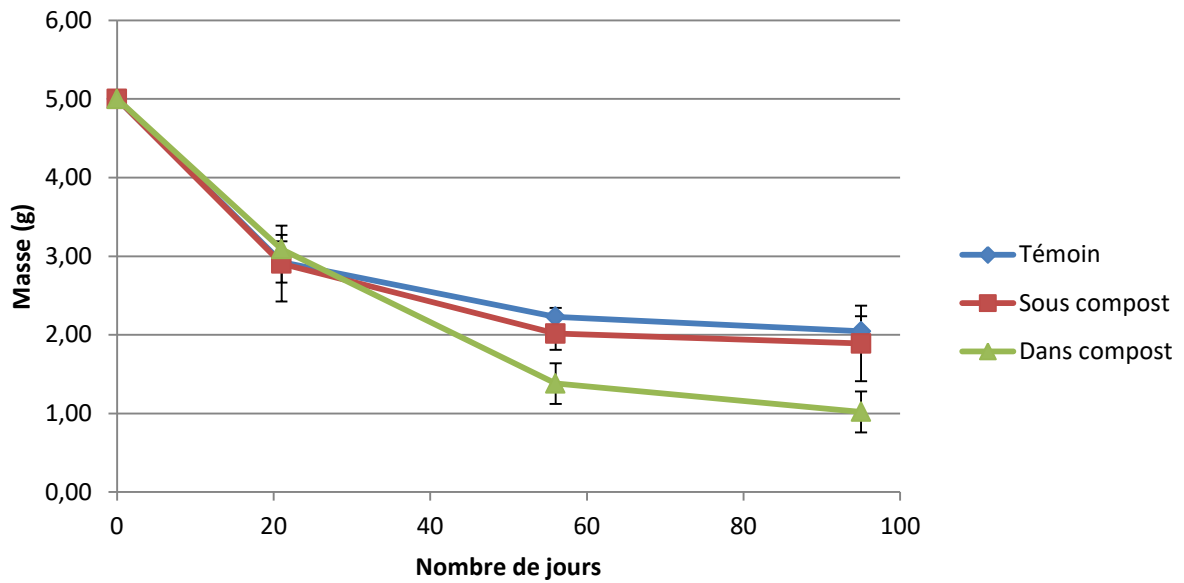
Cinétique de décomposition : Le Puit



Essai compost

Modalité	Date de mise en terre	Date de récolte	Poids de matière sèche finale (g)	Moyenne	Ecart-type
T0 (sol à côté du compost)	18-mai	07-juin	3,21	2,93	0,26
T0 (sol à côté du compost)	18-mai	07-juin	2,88		
T0 (sol à côté du compost)	18-mai	07-juin	2,69		
T0 (sol à côté du compost)	18-mai	08-juil	2,15	2,23	0,11
T0 (sol à côté du compost)	18-mai	08-juil	2,31		
T0 (sol à côté du compost)	18-mai	08-juil			
T0 (sol à côté du compost)	18-mai	16-août	1,91	2,05	0,19
T0 (sol à côté du compost)	18-mai	16-août			
T0 (sol à côté du compost)	18-mai	16-août	2,18		
Sol sous le compost	18-mai	07-juin	3,46	2,91	0,48
Sol sous le compost	18-mai	07-juin	2,59		
Sol sous le compost	18-mai	07-juin	2,67		
Sol sous le compost	18-mai	08-juil	2,16	2,02	0,21
Sol sous le compost	18-mai	08-juil			
Sol sous le compost	18-mai	08-juil	1,87		
Sol sous le compost	18-mai	16-août	1,89	1,89	#DIV/0!
Sol sous le compost	18-mai	16-août			
Sol sous le compost	18-mai	16-août			
Compost végétal	18-mai	07-juin	3,3	3,09	0,18
Compost végétal	18-mai	07-juin	2,97		
Compost végétal	18-mai	07-juin	3		
Compost végétal	18-mai	08-juil	1,3	1,38	0,26
Compost végétal	18-mai	08-juil	1,17		
Compost végétal	18-mai	08-juil	1,67		
Compost végétal	18-mai	16-août	1,02	1,02	#DIV/0!
Compost végétal	18-mai	16-août			
Compost végétal	18-mai	16-août			

Cinétiques de décomposition, essai Valabre

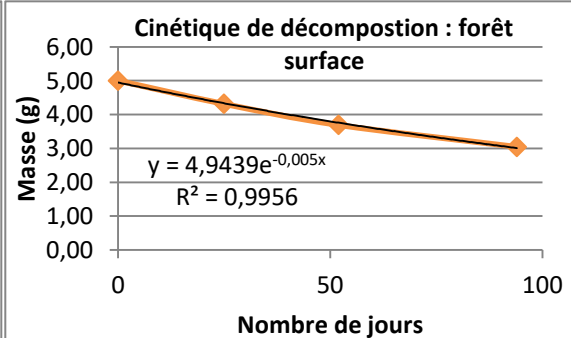
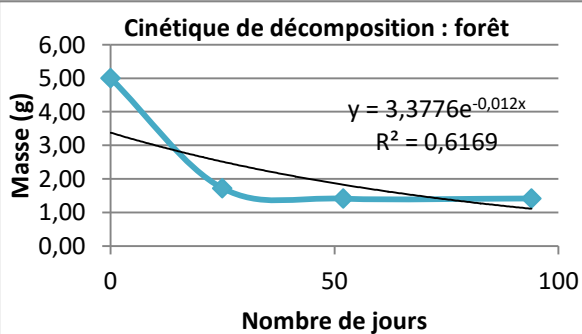
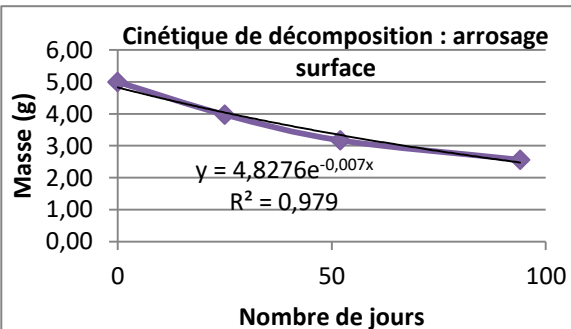
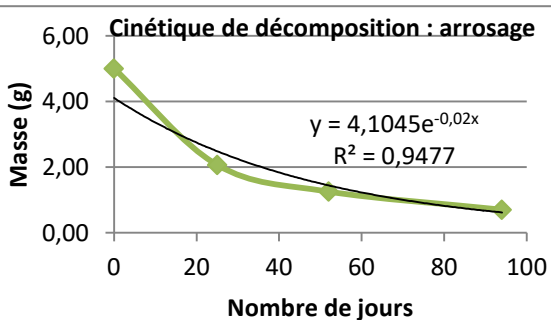
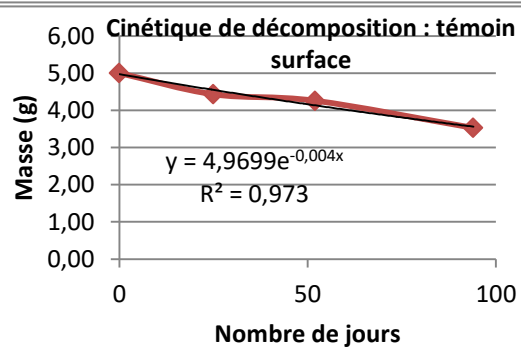
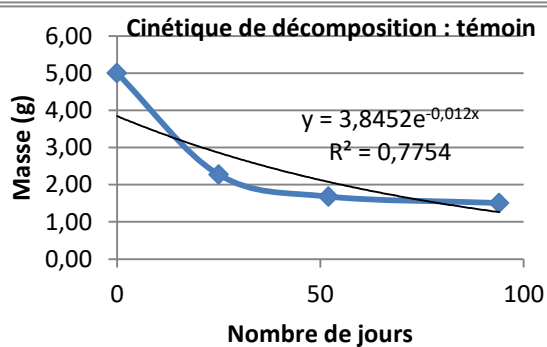
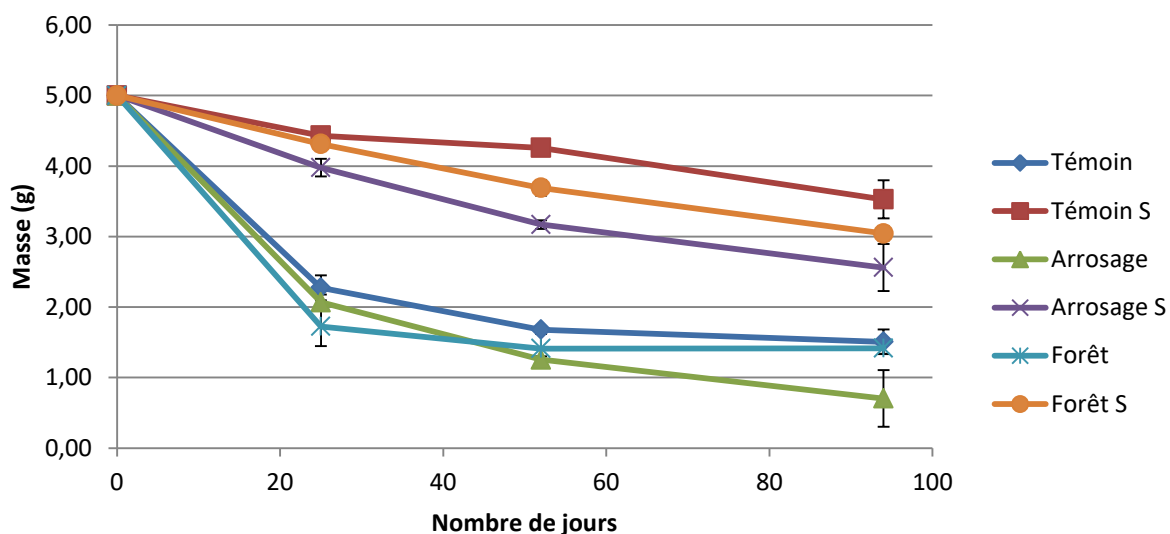


Essai Ferme Saint Georges

Modalité	Date de mise en terre	Date de récolte	Poids de la matière sèche finale (g)	Moyenne	Ecart-type
Témoin 10cm	01-juil	26-juil	2,07	2,27	0,18
Témoin 10cm	01-juil	26-juil	2,35		
Témoin 10cm	01-juil	26-juil	2,4		
Témoin 10cm	01-juil	22-août	1,69	1,42	0,45
Témoin 10cm	01-juil	22-août	0,9		
Témoin 10cm	01-juil	22-août	1,67		
Témoin 10cm	01-juil	03-oct	1,68	1,51	0,18
Témoin 10cm	01-juil	03-oct	1,33		
Témoin 10cm	01-juil	03-oct	1,51		
Témoin surface	01-juil	26-juil	4,42	4,43	0,01
Témoin surface	01-juil	26-juil	4,44		
Témoin surface	01-juil	26-juil	4,43		
Témoin surface	01-juil	22-août	4,23	4,26	0,03
Témoin surface	01-juil	22-août	4,25		
Témoin surface	01-juil	22-août	4,29		
Témoin surface	01-juil	03-oct	3,31	3,53	0,27
Témoin surface	01-juil	03-oct	3,83		
Témoin surface	01-juil	03-oct	3,44		
Arrosage 10cm	01-juil	26-juil	2,14	2,07	0,11
Arrosage 10cm	01-juil	26-juil	1,94		
Arrosage 10cm	01-juil	26-juil	2,12		
Arrosage 10cm	01-juil	22-août	1,29	1,25	0,05
Arrosage 10cm	01-juil	22-août	1,27		
Arrosage 10cm	01-juil	22-août	1,2		
Arrosage 10cm	01-juil	03-oct	0,24	0,70	0,40
Arrosage 10cm	01-juil	03-oct	0,94		
Arrosage 10cm	01-juil	03-oct	0,93		

Arrosage surface	01-juil	26-juil	3,91	3,98	0,12
Arrosage surface	01-juil	26-juil	3,9		
Arrosage surface	01-juil	26-juil	4,12		
Arrosage surface	01-juil	22-août	3,1	3,17	0,06
Arrosage surface	01-juil	22-août	3,19		
Arrosage surface	01-juil	22-août	3,22		
Arrosage surface	01-juil	03-oct	2,7	2,56	0,33
Arrosage surface	01-juil	03-oct	2,18		
Arrosage surface	01-juil	03-oct	2,8		
Forêt 10 cm	01-juil	26-juil	2,01	1,72	0,28
Forêt 10 cm	01-juil	26-juil	1,7		
Forêt 10 cm	01-juil	26-juil	1,46		
Forêt 10 cm	01-juil	22-août	1,17	1,41	0,21
Forêt 10 cm	01-juil	22-août	1,55		
Forêt 10 cm	01-juil	22-août	1,51		
Forêt 10 cm	01-juil	03-oct	1,34	1,42	0,08
Forêt 10 cm	01-juil	03-oct	1,41		
Forêt 10 cm	01-juil	03-oct	1,5		
Forêt surface	01-juil	26-juil	4,36	4,31	0,04
Forêt surface	01-juil	26-juil	4,28		
Forêt surface	01-juil	26-juil	4,3		
Forêt surface	01-juil	22-août	3,81	3,69	0,11
Forêt surface	01-juil	22-août	3,67		
Forêt surface	01-juil	22-août	3,59		
Forêt surface	01-juil	03-oct	3,15	3,04	0,10
Forêt surface	01-juil	03-oct	3,03		
Forêt surface	01-juil	03-oct	2,95		

Cinétique de décomposition : essai ferme Saint Georges



Annexe 18 : Tableau de données relatif à l'ACP pour l'indicateur Slake test

Echantillon	Modalité	Dose (t/ha/an)	Fréquence	Durée d'apport (années)	Dose cumulée (t/ha)	Enherbement (mois/an)	Durée enherbement (années)	Durée cumulée (mois)	Moyenne	Ecart type	pH	MO %	C / N	Argiles %	Limons %	Sables %
Château de Trians	Témoin	0	0	0	0	0	0	0	11,00	0,00	8,20	1,90	8,90	23,70	49,20	27,00
Château de Trians	Compost	12	1	3	36	12	4	48	11,00	0,00	8,20	4,47	11,30	17,20	52,00	30,80
Château de Trians voisin	Organo-minéral	0,5	0,5	16	4	0	0	0	6,00	2,14	8,20	2,24	10,40	22,00	39,60	38,50
Beaupré	Compost	3	1	0,5	1,5	0	0	0	5,00	3,21	8,30	1,38	10,20	22,60	41,20	36,30
Beaupré	Témoin	0	0	0	0	0	0	0	1,50	0,55	8,30	2,27	10,50	26,00	36,70	37,30
Beaupré	Organo-minéral	1	1	0,5	0,5	0	0	0	1,50	1,17	8,30	1,77	9,70	20,70	41,10	38,20
Jeanette	Organo-minéral	0,6	0,5	8	2,4	0	0	0	1,50	0,55	7,90	1,97	8,80	28,60	27,50	44,00
Janin	Organo-minéral	1	0,5	15	7,5	0	0	0	2,00	0,52	6,00	1,05	8,60	27,00	23,30	49,80
Pumant travaillé	Compost	5	0,5	7	17,5	6	7	42	11,00	2,58	6,40	1,25	8,70	23,40	26,70	49,90
Pumant enherbé	Compost	5	0,5	7	17,5	6	7	42	11,00	0,00	5,70	1,25	8,30	22,20	27,10	50,70
Le Puit	Org	0,6	0,	50	15	0	0	0	3,	0,	8,	0,	8,	1,	43	4

	ano-minéral		5						00	63	,	,	,	5,	,4	1,
											5	8	8	5	0	2
											0	2	0	0		0
Condroyer travaillé	Com post	5	0,5	5	12,5	3	5	15	7,00	3,67	8,00	,,87	11,20	21,90	39,20	39,00
Condroyer enherbé	Com post	5	0,5	5	12,5	3	5	15	8,00	2,25	8,00	,,87	11,20	21,90	39,20	39,00
Grenache gobelet voisin Les Fouques	Org ano-minéral	0,6	0,5	20	6	0	0	0			7,60	1,22	11,70	14,50	47,20	38,30
Grenache gobelet Les Fouques travaillé	Com post	5	0,5	20	50	6	20	120			7,10	3,49	13,10	12,50	54,70	32,80
Forêt Les Fouques	BRF	3	1	200	600	12	100	1200	11,00	0,00	6,40	3,76	14,10	15,10	25,90	59,00
Plan de la Tour - Les Courtes	Org ano-minéral	0,7	0,5	33	11,55	0	0	0	5,00	1,33	5,90	,,11	10,60	8,60	19,20	72,20
Plan de la Tour - Les Longues	Com post	10	0,5	0,5	2,5	0	0	0	1,00	0,00	6,30	2,52	13,40	11,40	30,50	58,20
Plan de la Tour - Martoune	Ani mal	10	0,5	8	40	0	0	0	1,50	0,98	6,60	1,10	8,80	4,80	15,10	80,20
Forêt Plan de la Tour	BRF	1,6	1	200	320	12	100	1200	11,00	0,00	6,30	2,11	14,10	6,80	12,30	80,00
Judith Ricard	Tém oin	0	0	0	0	12	20	240	11,00	1,33	8,10	4,10	10,80	21,40	55,80	22,90

														0			
Judith Ricard	BRF	100	1	0,5	50	12	24	288	11,00	0,00							
Vignes Valérie Pourchier Travaillées	Organo-minéral	0,6	1	24	14,4	0	0	0	2,50	3,82	8,40	2,02	10,10	22,90	56,50	20,60	
Vignes Valérie Pourchier Enherbées	Témoin	0	0	0	0	12	15	180	11,00	0,00	8,50	1,95	10,20	25,60	56,80	17,70	
Valabre T0 Enherbé	Témoin	0	0	0	0	12	10	120	11,00	0,00	8,10	3,89	10,70	16,60	45,30	38,20	
Valabre T0 Travaillé	Témoin	0	0	0	0	0	0	0	10,00	4,00	8,20	2,05	9,10	17,30	36,80	45,80	
Valabre T1 Enherbé	BRF	100	1	0,5	50	12	10	120	11,00	0,00	8,30	2,71	10,50	18,30	41,40	40,30	
Valabre T1 Travaillé	BRF	100	1	0,5	50	0	0	0	11,00	0,00	8,40	1,35	9,20	18,50	37,10	44,50	
Valabre T2 Enherbé	Compost	10	1	0,5	5	12	10	120	11,00	0,00	8,00	4,45	10,00	16,50	42,20	41,30	
Valabre T2 Travaillé	Compost	10	1	0,5	5	0	0	0	11,00	0,00	8,20	2,17	9,80	18,40	37,80	43,90	

Annexe 19 : Script R

```

1 < ##### SCRIPT ANALYSES STATISTIQUES #####
2
3 library(FactoMiner)
4 library(missMDA)
5 library(ggplot2)
6 library(Factoextra)
7 library(psy)
8
9 # chargement des données
10 Data_ACP <- read.csv2("C:/Users/alize/Documents/work Minou/Data_ACP2.csv")
11
12 # Conversion en variable numérique
13 str(Data_ACP)
14 Data_ACP$Enherbement <- as.numeric(Data_ACP$Enherbement)
15 Data_ACP$BM <- as.numeric(Data_ACP$BM); Data_ACP$NL <- as.numeric(Data_ACP$NL)
16 Data_ACP$EFOOT <- as.numeric(Data_ACP$EFOOT) ; Data_ACP$SFOOT <- as.numeric(Data_ACP$SFOOT)
17
18 # vecteur des variables actives quantitatives
19 actives <- Data_ACP[11:19]
20
21 # vecteur des variables supplémentaires quantitatives
22 supp_quantif <- Data_ACP[3:10]
23
24 # vecteur de la variable supplémentaire qualitative
25 supp_qualif <- Data_ACP[1:2]
26
27 # Imputation des données manquantes
28 Data_ACP2 <- imputePCA(Data_ACP[3:19], ncp=4)
29 Data_ACP3 <- as.data.frame(Data_ACP2)
30 Data_ACP4 <- as.data.frame(Data_ACP3[1:17])
31
32 # Création d'un nouveau dataframes
33 Quali <- as.data.frame(Data_ACP[1:2])
34 Data_comp <- cbind(Quali, Data_ACP4)
35 names(Data_comp) <- substr(names(Data_ACP),1,19)
36
37 # ACP avec une variable qualitative supplémentaires (Modalités)
38 res.pca <- PCA(Data_comp, quali.sup = 1:2, quanti.sup = 3:10)
39
40 # Valeurs propres associées aux axes
41 eigenvalues <- res.pca$eig
42 barplot(eigenvalues[, 2], names.arg=1:nrow(eigenvalues), main = "variances", xlab = "Principal components",
43         ylab = "Percentage of variances", col = "steelblue")
44 lines(x = 1:nrow(eigenvalues), eigenvalues[, 2], type="b", pch=19, col = "red")
45
46 # qualité de représentation des individus
47 res.pca$ind$cos2
48
49 # qualité de représentation des variables
50 res.pca$var$cos2
51
52 # Contribution des individus
53 res.pca$ind$contrib
54
55 # Contribution des variables
56 res.pca$var$contrib
57
58 # Graphe variable quantitatives
59 fviz_pca_var(res.pca, col.var="contrib")+ scale_color_gradient2(low="white", mid="blue",
60                           high="red", midpoint=55)+theme_bw()
61
62 # Graphe des individus
63 fviz_pca_ind(res.pca, label="none", habillage=Data_ACP$Modalite)
64
65 # Coordonnées des variables
66 res.pca$var$coord
67
68 # ACP focalisée sur la moyenne du slake test
69 expliquer <- "Moyenne_ST"
70 explicatives <- c("ET_ST", "D", "Enherbement", "pH", "MO.", "C.N", "A.", "L.", "S.")
71 fpcac(data= Data_ACP,y=expliquer, x=explicatives, partial="no")

```

Annexe 20 : Tableau de données relatif à l'ACP regroupant tous les indicateurs

Echantillon	Modalité	D	Exherbement	pH	MO ₃	C/N	A ₁	L	S	Moyenne_ST	ET_ST	LB	BM	NL	SI	EI	EFOOT	SFOOT	
1	Beaupre	Compost	1.5	0	8.5	1.80	10.2	22.6	41.2	56.1	5.0	5.21	0.01400000	185	153	64.3	28.2	3	40
2	Beaupre	Témoïn	0.0	0	8.3	2.27	10.5	26.0	36.7	37.3	1.5	0.55	0.02000000	151	256	52.0	25.0	7	27
3	Beaupre	Organo-minéral	0.5	0	8.3	1.70	8.7	20.7	41.1	38.2	1.5	1.17	0.01600000	180	121	74.5	39.7	8	43
4	Jarvis	Organo-minéral	7.5	0	6.0	1.05	8.6	27.0	23.3	49.8	2.9	0.52	0.01500000	128	706	12.6	63.9	277	10
5	PumardT	Compost	17.5	42	6.4	1.25	8.7	23.4	26.7	49.9	11.0	2.58	0.02400000	125	302	37.9	55.4	64	66
6	Le Puit	Organo-minéral	15.9	0	8.5	0.82	8.8	15.5	43.4	41.2	3.0	0.63	0.01300000	66	745	13.6	94.8	1192	1
7	CondroyerT	Compost	12.5	15	8.0	0.87	11.2	21.9	39.2	39.0	7.8	3.67	0.01700000	107	341	63.9	56.7	32	103
8	Valabre_T0	Témoïn	0.0	120	8.1	3.89	10.7	16.8	45.3	58.2	11.0	0.00	0.03400000	525	1635	60.2	35.9	183	420
9	Valabre_T0	Témoïn	0.0	0	8.2	2.05	9.1	17.3	36.8	45.8	30.0	4.00	0.02859431	284	341	71.3	46.2	27	103
10	Valabre_T1	BRF	50.0	120	8.3	2.71	10.5	16.3	41.8	40.3	15.0	0.00	0.05960000	252	782	66.4	50.0	135	235
11	Valabre_T1	BRF	50.0	0	8.4	1.35	9.2	18.5	37.1	44.5	11.0	0.00	0.03689304	264	147	55.3	51.1	24	14
12	Valabre_T2	Compost	5.0	120	8.0	4.45	10.0	16.5	42.2	41.3	11.0	0.00	0.03600000	475	1287	56.5	45.3	186	151
13	Valabre_T2	Compost	5.0	0	8.2	2.17	9.8	18.4	37.8	43.9	11.0	0.00	0.03671503	280	363	66.1	52.5	54	154

Annexe 21 : Résultats statistiques relatifs à l'ACP regroupant tous les indicateurs

```
> res.pca$ind$contrib
```

	Dim.1	Dim.2	Dim.3	Dim.4	Dim.5
1	0.9485981	19.13895033	1.363659	4.79564989	3.922894512
2	2.0896084	4.27621221	24.186572	6.37251265	0.775473479
3	2.3348293	7.42519192	11.102556	0.91811333	10.405455237
4	10.4233910	6.11198069	6.396209	0.37882376	19.941002880
5	0.7905372	0.10030603	11.114294	0.76019453	30.062706628
6	25.9057928	37.56980454	1.323063	2.07129421	16.281653081
7	2.2655009	4.29223129	6.317067	11.37814856	0.008722458
8	30.8755188	7.47261058	11.611762	17.38493828	0.017893975
9	0.4639470	7.12831211	12.120322	9.51814601	0.240637726
10	11.2715743	1.61302498	6.807194	13.01350598	13.136732536
11	0.2991577	0.16457281	4.558173	26.69804026	2.167412386
12	10.8227578	4.68755909	1.386023	0.09919332	2.481130084
13	1.5087866	0.01924342	1.713107	6.61143921	0.558285017

Contribution des individus aux différentes dimensions

```
> res.pca$var$contrib
```

	Dim.1	Dim.2	Dim.3	Dim.4	Dim.5
Moyenne_ST	14.838689	0.2351078	38.8477405	0.0406970	10.4515629
ET_ST	2.260455	13.8246438	17.0231758	45.4805583	0.7844116
LB	15.870776	1.1079116	11.5268292	21.6283984	3.7080777
BM	21.052994	0.8631113	4.1436636	1.9982267	0.2439451
NL	8.233307	18.1980414	4.7335354	15.1800723	3.2539493
SI	6.951830	20.9133372	0.2654351	0.5112320	46.7597850
EI	6.548244	18.6568017	22.4060015	0.1726144	2.3535919
EFOOT	5.167218	24.2224038	0.3694162	3.1791396	28.3080716
SFOOT	19.076487	1.9786415	0.6842027	11.8090612	4.1366048

Contribution des individus aux différentes dimensions


```
> res.pca$ind$cos2
```

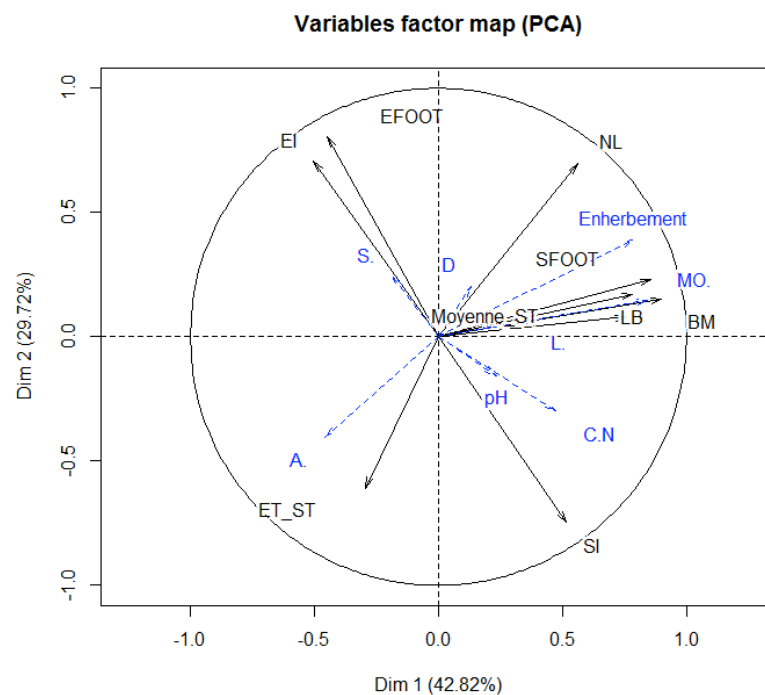
	Dim.1	Dim.2	Dim.3	Dim.4	Dim.5
1	0.05810210	0.813623066	0.019513132	0.061032699	1.989095e-02
2	0.16384148	0.232709288	0.443042083	0.103818594	5.033443e-03
3	0.20325900	0.448639850	0.225802800	0.016607200	7.498856e-02
4	0.56485211	0.229881076	0.080976698	0.004265485	8.945652e-02
5	0.11978441	0.010548738	0.393433706	0.023933608	3.770903e-01
6	0.47707756	0.480204869	0.005692257	0.007925732	2.482161e-02
7	0.22903007	0.301166674	0.149195402	0.239004109	7.299724e-05
8	0.72119758	0.121145662	0.063365060	0.084375943	3.460080e-05
9	0.04215885	0.449575501	0.257303842	0.179712491	1.810187e-03
10	0.55778355	0.055401017	0.078697503	0.133807647	5.381555e-02
11	0.03684871	0.014069403	0.131166999	0.683292967	2.210054e-02
12	0.64518410	0.193949198	0.019303136	0.001228665	1.224432e-02
13	0.31222665	0.002763885	0.082820593	0.284278259	9.563952e-03

Qualité de représentation des individus sur les différentes dimensions

```
> res.pca$var$cos2
```

	Dim.1	Dim.2	Dim.3	Dim.4	Dim.5
Moyenne_ST	0.57178794	0.006287847	0.349717162	0.0003258422	0.0333395688
ET_ST	0.08710346	0.369733617	0.153246923	0.3641419765	0.0025022042
LB	0.61155797	0.029630576	0.103767425	0.1731686692	0.0118284427
BM	0.81124744	0.023083506	0.037302305	0.0159988847	0.0007781634
NL	0.31725888	0.486698084	0.042612480	0.1215398786	0.0103798127
SI	0.26787896	0.559317397	0.002389514	0.0040932002	0.1491596117
EI	0.25232734	0.498967412	0.201704479	0.0013820446	0.0075077518
EFOOT	0.19911146	0.647816832	0.003325578	0.0254539131	0.0903002648
SFOOT	0.73508550	0.052917839	0.006159366	0.0945497385	0.0131954065

Qualité de représentation des variables sur les différentes dimensions



Carte de représentation des variables projetées sous R

Recherche de bioindicateurs du sol

Résumé : Le compartiment sol est encore méconnu et plus particulièrement la partie biologique de son fonctionnement car elle n'a été considérée qu'à partir des années 90. Une prise en compte récente de l'importance de ce compartiment pour l'humanité et non seulement comme support de nos cultures a permis la mobilisation de fonds pour l'étude approfondie de l'activité biologique du sol.

En région PACA, le constat est le même. Peu de données sont disponibles et les conseils promulgués aux agriculteurs se basent sur des connaissances limitées des impacts qu'ils pourraient avoir. Pendant ce temps, les taux de matières organiques sont de plus en plus faibles dans la région et les sols « partent à la mer ».

L'étude réalisée présente plusieurs indicateurs de l'activité biologique du sol testés sur trois sites expérimentaux principaux présentant différentes modalités se différenciant par l'apport de fertilisants organo-minéraux, de compost, de matière fraîche ou pas d'apport. La nématofaune, la biomasse microbienne, les litterbags, le test bêche et le slake test ont tous révélés l'intérêt de l'enherbement et le fait qu'un sol est un compartiment modifiable à long termes. Plus précisément, la nématofaune est un indicateur complexe et cher mais précis ; les litterbags et le slake test sont économes et visuels. Le premier est chronophage alors que le second est rapide et efficace. Cependant, la méthode demande encore à être étudiée. La biomasse microbienne et le test bêche ont montré un intérêt plus limité.

Mots-clés : sol, activité biologique, indicateur

Soil bioindicator study

Abstract: Soil is still misunderstood and especially the biological part of it because we began to take care of it in the nineties. The soil importance awareness as a necessity for human being allowed mobilize funding for the deep soil study.

In PACA, the observation is similar. Few data are available and the advices toward farmers don't take care of the potential impacts that could occur. Meanwhile, soil organic matter decreases and soils set out to sea.

The study introduces some indicators of soil biological activity which were tested on three main experimental sites. Each includes different modalities: fertilizer, compost, fresh vegetables or nothing. The nematode index, the microbial biomass, the litterbags, the spade test and the slake test showed the grass growing interest and the soil important period to move. More specifically, the nematode index is complex and expensive but accurate; litterbags and slake test are economical and visual. First one is time consuming whereas the second one is quick and efficient. However, the slake test needs more study. The microbial biomass and the spade test don't show any particular interest in this study.

Keywords : soil, biological activity, indicator