

## La caractérisation du fonctionnement biologique du sol en viticulture biologique peut être réalisée par l'analyse de la nématofaune

Coll P.<sup>1</sup>, Le Cadre E.<sup>2</sup>, Mérot A.<sup>3</sup>, Villenave C.<sup>4</sup>

<sup>1</sup>IRD, UMR 210 Eco&Sols, 2 place Viala, 34060 Montpellier cedex2 et Laboratoire Rière, 38 avenue de Grande-Bretagne, F-66000 Perpignan

<sup>2</sup>Montpellier SupAgro, UMR 1222 Eco&Sols, 2 place Viala, F-34060 Montpellier cedex2

<sup>3</sup>INRA, UMR System, 2 place Viala, F-34060 Montpellier cedex2

<sup>4</sup>ELISOL environnement, 2 place Viala, F-34060 Montpellier cedex2 et IRD, UMR 210Eco&Sols, 2 place Viala, 34060 F-Montpellier cedex2

**Correspondance** : cecile.villenave@elisol-environnement.fr

### Résumé

La nématofaune du sol est un bioindicateur qui permet de mettre en lumière les changements de fonctionnement biologique lors de changement de pratiques agricoles. Dans l'étude présente, les effets de la conversion de vignobles en agriculture biologique sur la qualité biologique du sol sont évalués. Vingt-quatre parcelles d'un domaine viticole (Cruscades, Aude), conduites en conventionnel et en agriculture biologique ont été étudiées. Elles se répartissent en 4 groupes : (1) conduites en conventionnel (Conventionnel), (2) converties depuis 7 ans (Bio 7 ans), (3) converties depuis 11 ans (Bio 11 ans) et (4) converties depuis 17 ans (Bio 17 ans). La nématofaune a été analysée sur 96 échantillons de sol (4 échantillons par parcelle) prélevés dans la strate superficielle de sol (0-15 cm). Plus les parcelles sont converties en viticulture biologique depuis longtemps, plus l'activité biologique du sol est importante. Les effets de la conversion sur le fonctionnement biologique du sol sont significatifs relativement tardivement ( $\geq 11$  ans). Par ailleurs, l'étude de la diversité fonctionnelle des nématodes montre que le sol reste aussi perturbé dans le mode de conduite biologique que dans le mode de conduite conventionnel (pas d'augmentation de la diversité fonctionnelle de la micro-chaîne trophique du sol mesurée par l'Indice de Structure).

**Mots-clés** : Nématodes, indicateur biologique, biodiversité, vignoble, agriculture biologique, chaîne trophique

**Abstract:** The characterization of the soil biological quality of organic viticulture can be achieved by analyzing soil nematofauna

Soil nematofauna is a bioindicator that can highlight changes in biological functioning when changing agricultural practices. In the present study, the effects of conversion of vineyards to organic agriculture on biological soil quality were evaluated. Twenty four conventional plots and organic plots in Cruscades (Aude) were studied: they were divided into four groups: (1) conventional, (2) converted for 7 years (Bio 7 years), (3) converted for 11 years (Bio 11) and (4) converted for 17 (Bio 17). The nematofauna was analyzed in 96 soil samples (four samples per plot) taken from the surface layer of soil (0-15 cm). The more longer the conversion of plots to organic viticulture, the higher the biological activity of the soil; it is the abundance of non-plant parasitic nematodes that gives this indication. The effects of conversion on soil biological functioning were significant relatively late ( $\geq 11$  years) after the change of practices. Moreover, the study of the functional diversity of nematodes shows that the soil remained disturbed in the organic as in the conventional system (no increasing complexity of the soil food web measured by the structure index).

**Keywords:** Nematodes, biological indicator, biodiversity, vineyard, organic farming, soil foodweb

## 1. Introduction

### 1.1 La viticulture biologique en France

Il existe une très grande diversité de pratiques culturales en vigne, en terme de gestion du sol (désherbage chimique, travail du sol et enherbement), de durée d'enherbement, de fertilisation (minérale, organique ou nulle), de restitution ou non des bois de taille ou encore de stratégies de protection phytosanitaire. Cette dernière décennie a été marquée par le nombre croissant de conversion des vignobles français à l'agriculture biologique. En effet, leur superficie a été multipliée par 8 entre 2001 et 2008 : 3 500 ha en 2001 et plus de 28 000 ha en 2008 (Agence Bio 2002, 2009). La conversion à l'agriculture biologique se traduit par un changement des pratiques culturales. Ainsi, les produits phytosanitaires de synthèse sont remplacés par des produits d'origine naturelle, les désherbants chimiques par de l'enherbement naturel maîtrisé par tonte ou par du travail du sol et les engrais minéraux par des apports de matière organique.

Les pratiques en agriculture biologique ont pour objet de permettre la production de denrées alimentaires saines, exemptes de résidus de produits chimiques mais également de permettre une exploitation durable des sols et de l'agrosystème dans son ensemble. Comme il existe des outils d'évaluation des quantités de résidus, il est nécessaire de proposer des outils pertinents d'évaluation de la qualité des sols permettant d'appréhender l'effet des pratiques sur la durabilité des systèmes. Dans ce contexte, des indicateurs de qualité des sols sont à rechercher. Par ailleurs, ces indicateurs doivent être utilisables par les professionnels de la filière agricole (Coll *et al.*, 2012a).

### 1.2 Les nématodes indicateurs du fonctionnement biologique du sol

De nombreux indicateurs de la qualité des sols sont disponibles. Même si les indicateurs physico-chimiques sont prépondérants pour une approche agronomique, les organismes du sol se montrent pertinents pour caractériser l'état et le fonctionnement du sol dans de nombreuses situations (Bispo *et al.*, 2012). Au sein des organismes du sol, les nématodes offrent une perspective particulièrement intéressante (Bongers et Ferris, 1999 ; Villenave *et al.*, 2009).

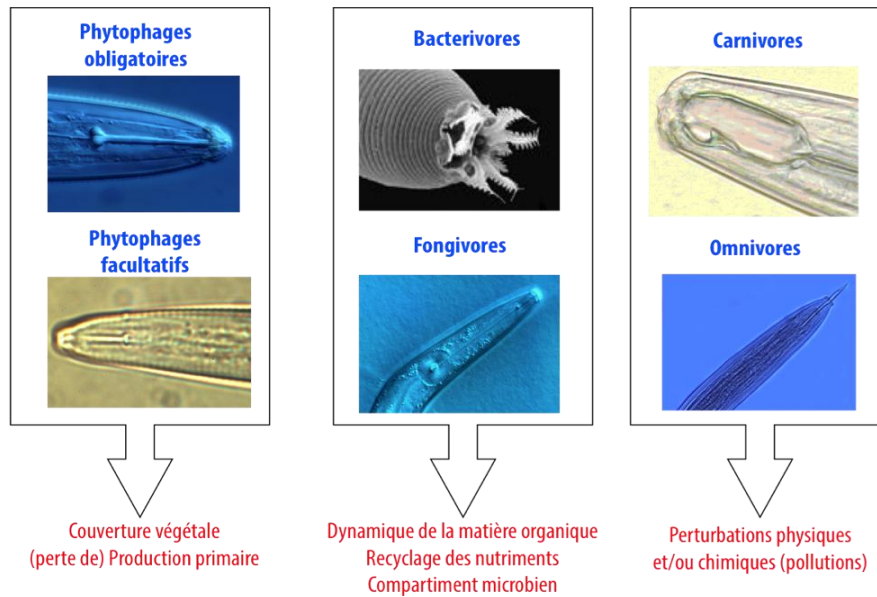
Les nématodes du sol sont des vers microscopiques (de l'ordre d'1 millimètre de longueur). De nombreuses caractéristiques de ces organismes en font de bons bioindicateurs :

- ils sont ubiquistes : présents dans tous les milieux, sous tous les climats, à toutes les latitudes ;
- ils sont abondants : dans un sol, on trouve de l'ordre d'1 million de nématodes par m<sup>2</sup> ;
- ils présentent une grande diversité taxonomique et fonctionnelle (différents comportements alimentaires, des capacités très variables à coloniser le milieu) pouvant être synthétisée par l'identification des 70 familles majeures ;
- ils ont un rôle clé dans la chaîne trophique, en particulier, rôle de régulateurs des micro-organismes ;
- ils sont sensibles aux conditions du milieu et aux perturbations physiques ou chimiques.

D'un point de vue fonctionnel, les nématodes peuvent être distingués selon leur comportement alimentaire dans le sol.

Chacun des groupes trophiques reflète une des fonctionnalités du sol (Figure 1):

- les nématodes phytophages (obligatoires ou facultatifs) renseignent sur la nature et l'état de la couverture végétale et, éventuellement, le risque de perte de rendement ;
- les nématodes microbivores (bactériovores et fongivores) renseignent sur le compartiment microbien, la dynamique de la matière organique et le recyclage des nutriments ;
- les nématodes de niveaux trophiques supérieurs (omnivores et prédateurs) reflètent les perturbations physiques ou chimiques du milieu.



**Figure 1 :** Les principaux groupes trophiques de nématodes et leurs indications.

A partir de l'identification des nématodes et de la connaissance de leurs comportements alimentaires et de leurs stratégies démographiques, on peut calculer des indices synthétiques permettant d'interpréter la qualité des sols.

Nous allons présenter les résultats obtenus sur l'analyse de la nématofaune dans le contexte de la conversion de parcelles viticoles en mode biologique au cours d'une étude conduite en Languedoc-Roussillon (Cruscades, Aude).

## 2. Le dispositif expérimental et les méthodes d'étude

*2.1 Les parcelles étudiées ont bénéficié de modes de conduite différents au cours des dernières années*

### **2.1.1 Cette étude a été réalisée dans un vignoble, situé dans le sud de la France.**

L'étude a été conduite en mai 2009 à Cruscades (Aude), commune située dans le sud de la France dans la région Languedoc-Roussillon (43 ° 11'29 .13 "N, 2 ° 49'1 .78" E, 26 - 50 m d'altitude). Le sol y est limono-argileux (42 ± 2% de limon, 36 ± 1% d'argile et 22 ± 2% de sable) et calcaire (208 ± 7 g CaCO<sub>3</sub> total kg<sup>-1</sup>); le pH<sub>eau</sub> s'élève à de 8,3.

L'étude a été menée en 2009, sur 24 parcelles en conditions réelles de production d'une superficie moyenne d'environ 1,5 ha (Figure 2).

Les parcelles se répartissent en 4 traitements:

- 10 parcelles conduites en agriculture conventionnelle : Conventionnel,
- 14 parcelles conduites en agriculture biologique (Bio),
  - 4 depuis septembre 2001 et certifiées officiellement depuis 2004 : Bio7,
  - 5 depuis septembre 1997 : Bio11,
  - 5 depuis septembre 1991 : Bio17.

Les prélèvements de sol ont été réalisés au milieu de l'inter rang sur 0-15 cm. Quatre répétitions par parcelle ont été réalisées.

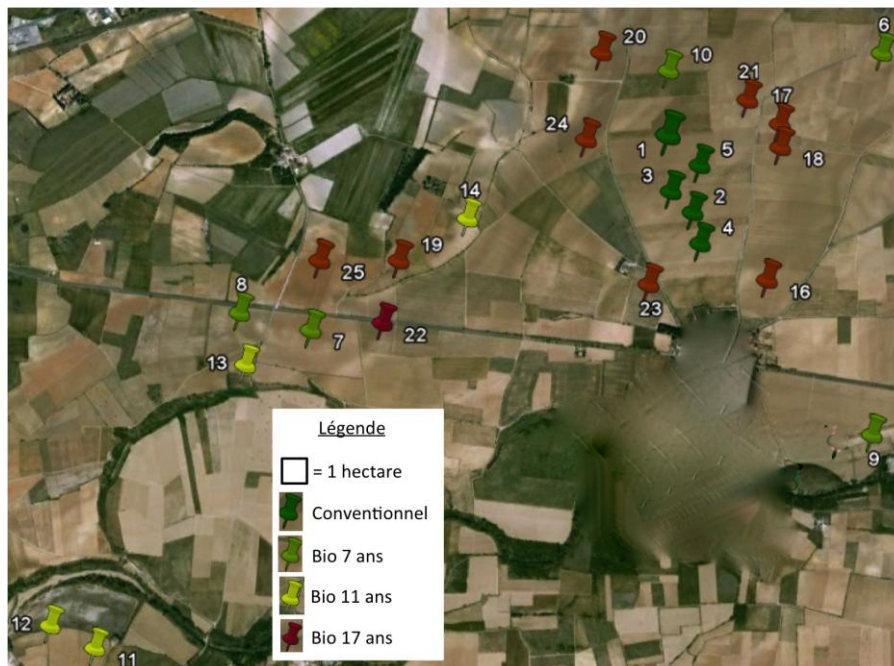


Figure 2 : Localisation des parcelles sur le terroir (problème de scan ? tâche floue sur la photo)

### 2.1.2 Des pratiques agricoles différenciées.

Les pratiques agricoles qui diffèrent entre les deux systèmes sont la gestion du sol, la fertilisation et la protection phytosanitaire. Le détail des différences entre les deux modes de gestion est présenté dans le Tableau 1.

Dans cette étude, la conversion du vignoble en viticulture biologique a consisté en la substitution des fertilisants minéraux par l'application de matières organiques exogènes, l'implantation d'un couvert végétal, une augmentation de la fréquence du travail du sol mais aussi le remplacement de pesticides de synthèse par des pesticides naturels.

Tableau 1 : Détail des pratiques agricoles dans les systèmes de conduite conventionnel et biologique

	Gestion du sol		Fertilisation	Protection phytosanitaire	Fréquence de passage du tracteur
	Rangs	Inter rangs	(N-P-K)		
conventionnel	désherbage chimique (glyphosate, 700g ha <sup>-1</sup> , 1 an <sup>-1</sup> )	labour (prof:15 cm, 2 an <sup>-1</sup> )	Minérale (10-10-20, 200 kg ha <sup>-1</sup> , 1 an <sup>-1</sup> )	de synthèse et naturel (6 traitements an <sup>-1</sup> )	14 an <sup>-1</sup>
biologique	labour (prof:10 cm, 1 an <sup>-1</sup> )	labour (prof:25 cm, 4 an <sup>-1</sup> )	compost (90% OM; 9-5-0, 500 kg ha <sup>-1</sup> , 1 an <sup>-1</sup> )	naturel (8 traitements an <sup>-1</sup> )	18 an <sup>-1</sup>

2.2 La nématofaune du sol a été étudiée en procédant selon les recommandations de la norme ISO 23611-4 (2011).

Les nématodes ont été extraits à partir de 200 g de sol humide par élutriation de Oostenbrink, complétée par passage actif sur filtre de ouate. Après dénombrement, les nématodes ont été fixés dans

une solution de formaldéhyde à 4%, et un sous-échantillon représentatif a été monté sur des lames d'ensemble pour l'identification à fort grossissement (x 400). En moyenne, 150 nématodes ont été identifiés par échantillon au niveau taxonomique du genre ou de la famille. Chaque taxon de nématodes a été affecté à l'un des six groupes trophiques : phytophages, bactériovores, fongivores, omnivores et les prédateurs. Les abondances des nématodes (exprimées en nombres de nématodes pour 100 g de sol sec) de chacun des groupes trophiques sont des paramètres utilisés pour le diagnostic de l'état du sol.

De plus, trois indices nématofauniques permettant de caractériser le fonctionnement du sol, calculés à partir de l'abondance de différentes guildes fonctionnelles de nématodes seront présentés : l'indice d'enrichissement (EI), l'indice de la structure (SI), l'indice des voies de décomposition (NCR) (Ferris *et al.*, 2001).

- L'Indice de Structure (IS) 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 bactériovores, les fongivores, les omnivores et les prédateurs),

- Le EI (Indice d'Enrichissement) donne une indication sur la dynamique des éléments nutritifs. L'EI augmente avec la disponibilité en nutriments et en particulier l'azote,

- Le NCR (Nematode Channel Ratio) ou indice des voies de décomposition est égal au rapport de l'abondance des nématodes bactériovores sur les nématodes microbivores (c'est à dire bactériovores + fongivores).

Par ailleurs, les principales caractéristiques physico-chimiques (Carbone organique, Azote total, CEC, pH, K, P, Cu) et la biomasse microbienne (fumigation-extraction) du sol ont été mesurées. L'abondance et la densité des vers de terre ont aussi été estimées par tri manuel de blocs de sol (40 x 40 cm x 20 cm de profondeur) (Coll *et al.*, 2011).

### **3. Les caractéristiques physico-chimiques et biologiques du sol évoluent avec la durée de conduite en mode biologique**

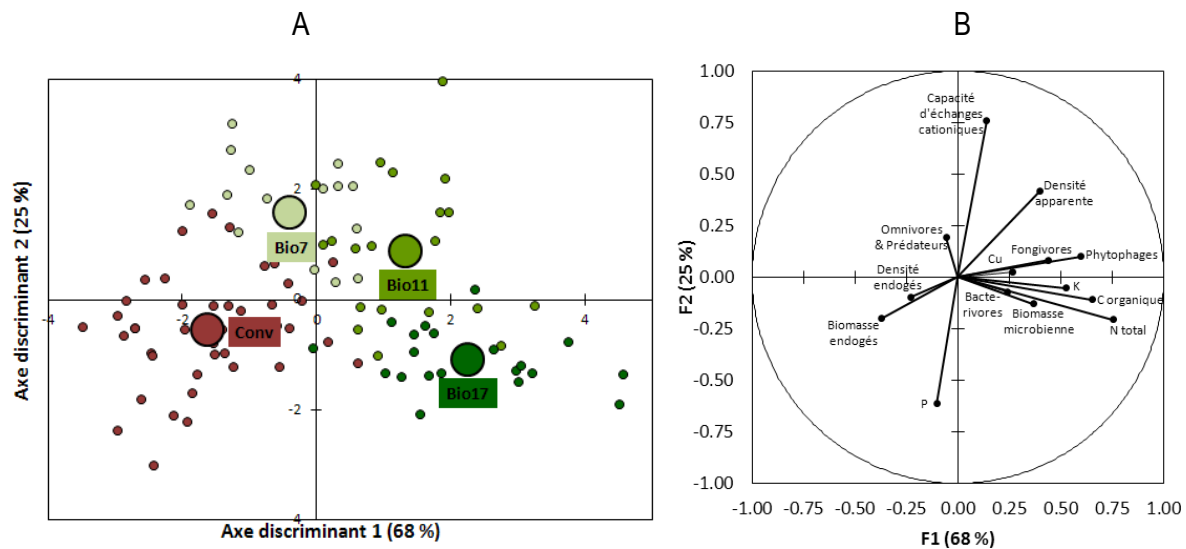
#### *3.1 Le sol s'enrichit en matière organique avec la durée de l'exploitation en mode biologique*

Le carbone organique total (ISO 10694, 1995) augmente de façon significative, passant de 10,2 mg g<sup>-1</sup> dans la parcelle conventionnelle à 13,5 mg g<sup>-1</sup> dans Bio17, avec 10,8 mg g<sup>-1</sup> dans Bio7 et 12,4 mg g<sup>-1</sup> dans Bio11. L'azote total (ISO 13878, 1998) augmente également avec la durée d'exploitation en mode biologique. La biomasse microbienne a significativement augmenté du mode conventionnel (77 mg C g<sup>-1</sup>) à Bio17 (101 mg C g<sup>-1</sup>).

Après 17 ans de viticulture biologique, la teneur en matière organique et la biomasse microbienne ont augmenté, respectivement +32 % et +34 %. Les transformations de la matière organique du sol ont conduit à l'augmentation de la teneur en phosphore (+ 133 % entre Bio7 et Bio17) et en potassium (+ 81 % entre Conventionnel et Bio17) disponibles (Coll *et al.*, 2011).

#### *3.2 L'analyse discriminante basée sur différents indicateurs de l'état du sol (physiques, chimiques et biologiques) sépare nettement les 4 conduites.*

On visualise sur la figure 3A un gradient du Conventionnel vers le Bio17 indiqué par l'axe 1. Cet axe explique 68 % de la variabilité et est défini principalement par l'azote total, le carbone organique total, la densité des nématodes phytoparasites et fongivores ainsi que par la teneur en potassium disponible (Figure 3B). Cela signifie que ce sont ces paramètres qui ont le plus évolué au cours du temps après la conversion en mode de conduite biologique. L'axe 2, contribuant à 25 % de la variabilité, est corrélé à la capacité d'échanges cationiques effective et la teneur en phosphore disponible (Figure 3B).



**Figure 3** : Analyse discriminante basée sur les 14 paramètres physiques, chimiques et biologiques pour les 4 traitements (Conventionnel, Bio7, Bio11 et Bio17). (A) Cercle de corrélations des différents indicateurs : physico-chimiques (capacité d'échange cationique, Corg, Ntotal, K, P, Cu), physique (densité apparente), biologiques (vers de terre : biomasse et densité des endogés ; nématodes : abondance des phytophages, fongivores, bactérivores, omnivores et prédateurs ; biomasse microbienne). (B) Distribution des 96 observations et de leur centroïde (symboles prédominants) pour chaque traitement le long des 2 axes discriminants.

#### 4. L'analyse de la nématofaune rend compte des modifications de fonctionnement biologique du sol en fonction de l'âge de la conversion.

##### 4.1 L'activité biologique augmente avec l'âge de la conversion

Comme le montrent les augmentations d'abondance des différents groupes de nématodes du sol, (Tableau 2), l'activité biologique augmente avec l'âge de la conversion (Figure 4). Nous avons montré que l'agriculture biologique tend à conduire à l'augmentation de l'abondance des nématodes microbivores, c'est à dire des nématodes qui consomment des bactéries et des champignons (+ 35 %, pour les bactérivores et + 97 %, pour les fongivores).

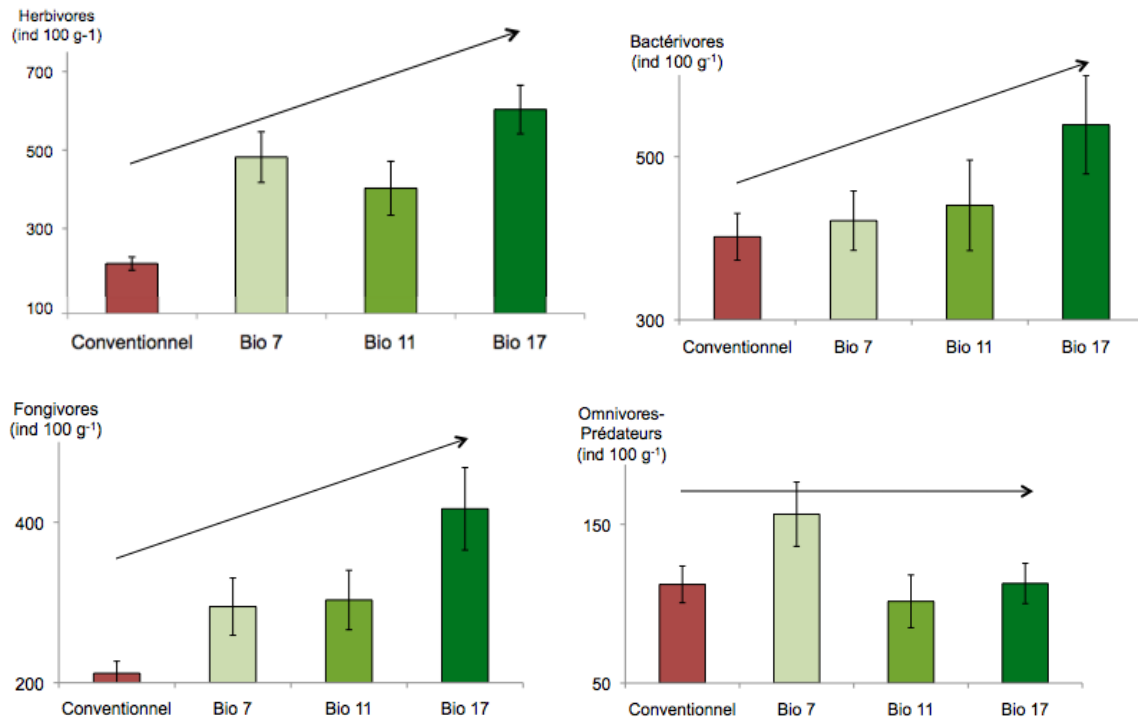
**Tableau 2**: Abondance des différents groupes trophiques de nématodes du sol (nématodes 100 g<sup>-1</sup> sol sec)

	Phytophages	Bactérivores	Fongivores	Omnivores & prédateurs	Total
Conventionnel	210 ± 17 c	402 ± 29 a	212 ± 15 b	112 ± 12 b	936 ± 49 c
AB 7 ans	474 ± 62 ab	422 ± 36 a	303 ± 38 a	156 ± 20 a	1355 ± 115 ab
AB 11 ans	403 ± 69 b	440 ± 55 a	303 ± 37 a	101 ± 17 b	1248 ± 137 bc
AB 17 ans	603 ± 62 a	541 ± 60 a	417 ± 51 a	113 ± 13 b	1672 ± 143 a

Moyenne ± Erreur standard. Dans une colonne, les valeurs d'abondance suivies de lettres différentes sont significativement différentes (seuil 90%)

Ceci indique une augmentation de la disponibilité des ressources en nutriments. La présence d'un enherbement en cours d'année dans les parcelles conduites en agriculture biologique entraîne l'augmentation de la densité des nématodes phytophages, non nuisibles pour la vigne (+ 187 %, après 17 ans de viticulture biologique). Cette modification est attribuée à la présence d'un couvert végétal plus dense, sur une plus longue période, pour les traitements Bio (Coll *et al.*, 2012b).

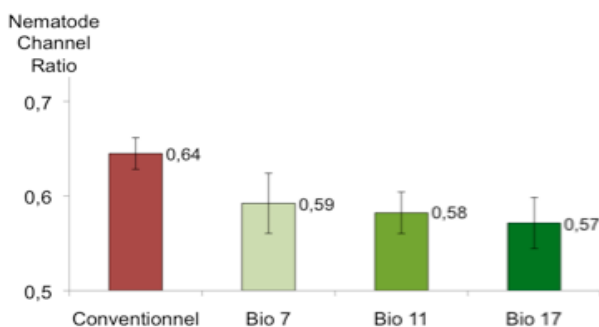
En revanche, aucune tendance d'augmentation n'est observée pour les nématodes des hauts niveaux de la chaîne trophique : les nématodes omnivores et prédateurs, pour qui le mode de conduite biologique n'a pas été bénéfique.



**Figure 4** : L'abondance des nématodes herbivores, bactérovores et fongivores tend à augmenter avec l'augmentation du nombre d'année en conduite viticole (moyenne  $\pm$  erreur-standard)

#### 4.2 La voie de décomposition fongique est accrue en viticulture biologique

Par rapport à la voie de décomposition bactérienne, la voie de décomposition fongique est accrue, révélant un changement dans la qualité de la matière organique du sol. En effet, l'indice NCR « nematode channel ratio » ou indice des voies de décomposition, décroît au fil du temps (Figure 5).



**Figure 5**: Le NCR (Nematode Channel Ratio) diminue significativement avec l'augmentation du nombre d'années en conduite viticole (moyenne  $\pm$  erreur-standard)

Cette évolution des valeurs de l'indice NCR reflète un changement de la qualité de la matière organique du sol. Ce changement est à relier à l'apport de composts qui sont des matières dont la décomposition est différente de la matière organique originellement présente dans le sol.



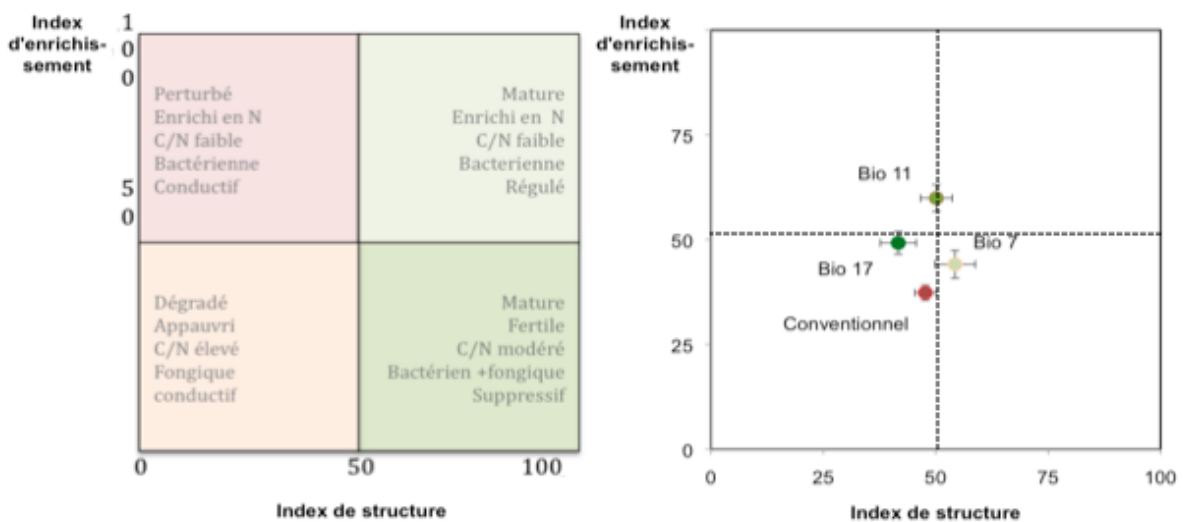
#### 4.3 Le diagnostic des réseaux trophiques du sol ne met pas en évidence de différences majeures entre les modes de conduites.

Ferris *et al.* (2001) ont développé les indices nématofauniques, l'Indice d'Enrichissement (EI) et l'Indice de Structure (SI) ; la représentation sur un plan des valeurs prises par les deux indices simultanément permet de décrire le fonctionnement du sol. L'Indice de Structure 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) ; l'Indice d'Enrichissement donne une indication sur la dynamique des éléments nutritifs. L'EI augmente avec la disponibilité en nutriments, et en particulier l'azote.

L'interprétation de ces indicateurs est réalisée dans un plan séparé en quatre quadrants représentant de façon très schématique quatre fonctionnements de sols différents : en bas à gauche : sol dégradé ; en haut à gauche : sol perturbé ; en haut à droite : sol mature et enrichi ; en bas à droite : sol mature et fertile (Figure 6).

Nous avons observé un changement dans la structure de la communauté de nématodes, c'est à dire que les abondances des différents nématodes présents sur le site sont sensiblement différentes entre les traitements (données non présentées ; Coll *et al.*, 2011). Toutefois, les indices EI, et SI sont restés sensiblement constants avec l'augmentation du temps de conduite en agriculture biologique. Les 4 traitements se trouvent au centre du diagramme du diagnostic des réseaux trophiques du sol indiquant des sols ayant un fonctionnement biologique satisfaisant dans les 4 modes de conduites, mais non différents entre eux.

#### 4.4 L'agriculture biologique n'a pas conduit clairement à une modification fonctionnelle ou à une amélioration de la longueur ou de la complexité de la microchaîne trophique du sol.



**Figure 6:** Le diagnostic de la microchaîne trophique « théorique » (adapté de Ferris *et al.*, 2001) est présenté dans la partie gauche de la figure, tandis que les valeurs prises par les 4 traitements sont présentés dans la partie droite de cette figure (moyenne  $\pm$  erreur-standard). Les différences ne sont pas statistiquement significativement pour SI entre les traitements ; EI est significativement plus élevé en Bio11 qu'en Conventiennel.



## **5. Le bilan des pratiques de viticulture biologique est plutôt positif mais pas sur l'ensemble des critères du fonctionnement biologique des sols.**

### *5.1 Une augmentation des ressources disponibles conduit à augmenter la densité des nématodes microbivores.*

Une augmentation des ressources disponibles, mesurée par un indice d'Enrichissement (EI) plus élevé, conduit à augmenter la densité des nématodes microbivores. Même si des changements sont observés dans la structure de la communauté de nématodes après conversion, l'indice de structure (SI) est resté constant. Par conséquent, les pratiques agricoles biologiques n'ont amélioré ni la longueur ni la complexité de la chaîne trophique du sol bien que quantitativement l'activité biologique soit plus importante ; le niveau de perturbation dans le sol n'a donc pas significativement diminué après conversion.

Pour compléter ce diagnostic, on signalera que dans cet essai la viticulture biologique a conduit à une diminution significative de l'abondance des vers de terre endogés (- 65 % en 17 ans) ; aucun ver de terre anécique ou épigé n'a été trouvé sur l'essai lors de l'échantillonnage par tri manuel du sol.

### *5.2 Effet du travail du sol sur leur fonctionnement biologique*

Il semblerait que le travail du sol réalisé en viticulture biologique, plus fréquent et plus profond qu'en viticulture conventionnelle, ait un effet négatif sur le fonctionnement biologique du sol que l'on mesure par les abondances des vers de terre et des nématodes omnivores et prédateurs.

Deux autres paramètres peuvent également expliquer que les groupes de faune du sol sensibles aux perturbations ne se développent pas plus en AB qu'en conventionnel : l'augmentation de la compaction (mesurée par la densité apparente du sol) et de la teneur en cuivre disponible (données non présentées, Coll *et al.*, 2011). Ces modifications de l'état physique et chimique du sol sont préjudiciables pour le fonctionnement du sol.

Dans cette étude, nous avons démontré que la période de transition 7-11 ans, dépendant des indicateurs considérés, était nécessaire pour séparer clairement les pratiques conventionnelles de celles organiques dans les vignobles du sud de la France. Malgré la diversité des indicateurs étudiés, nous soulignons la difficulté de mettre en évidence des bénéfices de l'agriculture bio, à court terme (<10 ans) sur la qualité globale du sol dans cette zone pédoclimatique particulière, et pour les types de pratiques culturales que nous avons étudiés.

## **6. Quand utiliser des études de bioindication pour caractériser le fonctionnement biologique du sol ?**

Les études de bio-indication atteignent leur plein potentiel lorsque l'interprétation des données peut se faire par rapport à une situation de référence choisie sur le site étudié, comme dans cette étude avec les parcelles conduites en mode conventionnel. De façon plus générale, deux types d'études sont possibles: les études synchroniques et les études diachroniques. Les études synchroniques consistent à comparer à une date d'étude des modalités différentes (comme réalisé dans ce travail) ; les études diachroniques consistent à suivre au cours du temps une même situation (un même domaine viticole étudié tous les ans par exemple). En effet, la nature du sol, le climat ainsi que la végétation sont des déterminants majeurs des communautés biologiques. Ainsi, il est souhaitable de réduire le nombre de facteurs qui varient simultanément pour pouvoir interpréter précisément les résultats des analyses. Une seule analyse contient de nombreuses informations, qui intègrent tous les facteurs impactant le sol, et qui renseignent sur différentes fonctions du sol : (1) niveau d'activité biologique globale, (2) disponibilité des nutriments, (3) stabilité / niveau de perturbation du sol, (4) risque lié aux nématodes parasites des cultures.

Par ailleurs, une analyse de la nématofaune du sol peut être utilisée seule pour caractériser le fonctionnement biologique du sol sur un site en utilisant un référentiel issu d'études antérieures. Les données disponibles, relatives à des analyses en agriculture biologique et en viticulture biologique, sont encore relativement sommaires. Elles sont toutefois en augmentation régulière.

### Références bibliographiques

- Agence BIO, 2002. L'agriculture biologique - Chiffres clés. Paris: Broché.
- Agence BIO, 2009. L'agriculture biologique - Chiffres clés. Paris: La documentation Française.
- Bispo A., Gattin I., Hedde M., Bodin J., Villenave C., Peres G., 2012. Quels bioindicateurs pour la gestion durable des sols agricoles et forestiers ? In Compte rendu des journées de restitution du projet « Bioindicateur pour la caractérisation des sols », Paris, 16 octobre 2012, 2012. Ed ADEME.
- Bongers T., Ferris H., 1999. Nematode community structure as a bioindicator in environmental monitoring. *Tree* 14, 224-228.
- Coll P., Le Velly R., Le Cadre E., Villenave C., 2012a. La qualité des sols : associer perceptions et analyses des scientifiques et des viticulteurs. *Etude et Gestion des Sols* 19, 79-89.
- Coll P., Le Cadre E., Villenave C., 2012b. How are nematode communities affected during a conversion from conventional to organic farming in southern French vineyards? *Nematology* 14, 665-676.
- 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.
- Ferris H., Bongers T., de Goede R., 2001. A framework for soil food web diagnostics: extension of the nematode faunal analysis concept. *Applied Soil Ecology* 18, 13-29.
- NORME NF EN ISO 23611-4 oct 2011. Qualité du sol - Prélèvement des invertébrés du sol - Partie 4: Prélèvement, extraction et identification des nématodes du sol.
- Villenave C., Ba A.O., 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.