

Impact des pratiques agricoles sur l'état biologique du sol :

SIPANEMA, un outil d'aide à la décision basé sur les nématodes

C. Villenave^(1*), C. Chauvin⁽¹⁾, J. Puissant^(2, 3), M. Henaux⁽²⁾ et J. Trap^(2*)

1) ELISOL environnement, ZA des Tourels, 10 avenue du midi, 30111 Congénies, France

2) UMR Eco&Sols, Univ Montpellier, IRD, INRAE, CIRAD, Institut Agro, 2 place Viala, 34060 Montpellier, France

3) Centre d'Ecologie Fonctionnelle et Evolutive, UMR 5175, CNRS, Montpellier, France

* Auteur correspondant : cecile.villenave@elisol-environnement.fr et jean.trap@ird.fr

RÉSUMÉ

La caractérisation des nématodes des sols renseigne sur différentes fonctionnalités du sol, et en raison de cette qualité, les nématodes sont utilisés comme indicateurs biologiques des écosystèmes terrestres depuis les années 1990. Par ailleurs, parmi les nématodes présents dans le sol, certains sont phytoparasites, bio-agresseurs des racines, bien connus en agriculture et pour lesquels un contrôle rigoureux est requis sous peine de perte de production. Pour évaluer qualitativement et quantitativement la présence de ces organismes dans les parcelles agricoles, il est nécessaire de réaliser des analyses d'échantillons de sol en laboratoire. Afin d'avoir une première évaluation théorique, un outil de simulation de l'effet des pratiques sur les nématodes des sols nommé SIPANEMA (Scénarios d'impacts des pratiques agricoles sur l'état biologique du sol) a été développé. Le moteur de calcul de l'outil utilise des données scientifiques issues de 2 bases de données : (1) des résultats d'une méta-analyse qui quantifie l'impact des pratiques agricoles (labour, pesticides, fertilisation, rotation, diversité végétale) sur la nématofaune et (2) Nemabase (Université de Davis, USA) qui synthétise les données scientifiques spécifiques pour les nématodes phytoparasites. SIPANEMA simule deux risques : le risque sur le fonctionnement biologique (RFB) et le risque de pression parasitaire due aux nématodes phytoparasites (RPP) à partir de la description des pratiques et de la diversité végétale présente sur la parcelle considérée renseignées par l'utilisateur de l'application en ligne. Cet outil innovant permet de sensibiliser les professionnels de l'agriculture sur les rôles joués par les nématodes et sur les effets des pratiques mises en œuvre dans des parcelles agricoles, d'identifier les parcelles à

Comment citer cet article :

Villenave C., Chauvin C., Puissant J., Henaux M. et Trap J., 2022 - Impact des pratiques agricoles sur l'état biologique du sol : SIPANEMA, un outil d'aide à la décision basé sur les nématodes - *Étude et Gestion des Sols*, 29, 199-209

Comment télécharger cet article :

<https://www.afes.fr/publications/revue-etude-et-gestion-des-sols/volume-29/>

Comment consulter/télécharger

tous les articles de la revue EGS :

<https://www.afes.fr/publications/revue-etude-et-gestion-des-sols/>

risque fort aussi bien en termes de perte de biodiversité que de pression phytoparasitaire, de hiérarchiser les parcelles pour des efforts de suivi de symptômes ou de diagnostic faunistique, et propose de simuler l'effet de changements de pratiques.

Mots-clés

Nématofaune, biologie du sol, pratiques agricoles, diversité végétale, bio-indicateur, nématodes phytoparasites, outil d'aide à la décision

SUMMARY

SIPANEMA, A DECISION-MAKING TOOL BASED ON NEMATODES

Nematodes are highly abundant, directly contribute to soil functioning and show high sensitivity for detecting change in soil quality as influenced by agricultural practices. Those attributes make nematodes key indicators of terrestrial ecosystem health and have been used as such since the 1990s. Among soil nematodes, some are phytoparasites, root bio-aggressors, well known in agriculture and for which rigorous control is required to avoid yield loss. To qualitatively and quantitatively assess the presence of these organisms in agricultural fields, it is necessary to perform laboratory analyzes of soil samples. To minimize sampling and analyses effort, we developed a tool that allows a first theoretical assessment, that simulates the effect of agricultural practices on soil nematodes called SIPANEMA (Scenarios of impacts of agricultural practices on the biological state of the soil). The tool's calculation engine was build based on two data databases: (1) results of a worldwide published meta-analysis which quantifies the impact of agricultural practices (plowing, pesticides, fertilization, crop rotation, plant diversity...) on nematofauna and (2) Nemabase (University of Davis, USA) which synthesizes specific scientific data for phytoparasitic nematodes. From the description of the agricultural practices and the plant diversity present on the plot considered and provided by the user of the online application, SIPANEMA simulates two risks: the risk on biological functioning (RFB) and the risk of parasitic pressure due to phytoparasitic nematodes (RPP). This innovative tool makes it possible to (i) prioritize agricultural fields that present the highest risk both in terms of biodiversity loss and phytoparasitic pressure; (ii) raise awareness among farmers and decision makers about the roles played by nematodes in agricultural practices and (iii) proposes to simulate the effects of changes of practices.

Key-words

Nematofauna, soil biology, practices, plant diversity, bio-indicator, phytoparasitic nematodes

RESUMEN

IMPACTO DE LAS PRÁCTICAS AGRÍCOLAS SOBRE EL ESTADO BIOLÓGICO DEL SUELO:

SIPANEMA, una herramienta de ayuda a la decisión basada en los conocimientos científicos sobre los nematodos

La caracterización de los nematodos del suelo proporciona información sobre las diferentes funcionalidades del suelo y, debido a esta calidad, los nematodos se utilizan como indicadores biológicos de los ecosistemas terrestres desde la década de 1990. Por otra parte, entre los nematodos presentes en el suelo, algunos son fitoparásitos, bioagresores de las raíces, bien conocidos en agricultura y para los cuales se requiere un control riguroso bajo riesgo de pérdida de producción. Para evaluar cualitativamente y cuantitativamente la presencia de estos organismos en las parcelas agrícolas, es necesario realizar análisis de laboratorio de muestras de suelo. Con el fin de tener una primera evaluación teórica, se desarrolló una herramienta de simulación del efecto de las prácticas sobre los nematodos de los suelos denominada SIPANEMA (Escenarios de impacto de las prácticas agrícolas sobre el estado biológico del suelo). El motor de cálculo de la herramienta utiliza datos científicos procedentes de 2 bases de datos: (1) de los resultados de un meta-análisis que cuantifica el impacto de las prácticas agrícolas (arado, plaguicidas, fertilización, rotación, diversidad vegetal) en la nematofauna y (2) Nemabase (Universidad de Davis, EE.UU.) que sintetiza los datos científicos específicos para los nematodos fitoparásitos. SIPANEMA simula dos riesgos: el riesgo sobre el funcionamiento biológico (RFB) y el riesgo de presión parasitaria debido a los nematodos fitoparásitos (RPP) a partir de la descripción de las prácticas y de la diversidad vegetal presente en la parcela considerada informadas por el usuario de la aplicación en línea. Esta herramienta innovadora permite sensibilizar a los profesionales de la agricultura sobre los papeles que desempeñan los nematodos y sobre los efectos de las prácticas aplicadas en las parcelas agrícolas, identificar las parcelas de alto riesgo tanto en términos de pérdida de biodiversidad como de presión fitosanitaria, priorizar las parcelas para los esfuerzos de seguimiento de los síntomas o de diagnóstico faunístico, y proponer simular el efecto de los cambios de prácticas.

Palabras clave

Nematofauna, biología del suelo, prácticas agrícolas, diversidad vegetal, bioindicadores, nematodos fitoparásitos, herramienta de ayuda a la decisión

Le sol est un milieu vivant, la multitude d'organismes présents contribue à la réalisation de nombreuses fonctions clé dont certaines sont cruciales pour les agrosystèmes et la durabilité de la production (Gobat *et al.*, 2004; Barrios, 2007). Favoriser la biodiversité des sols tout en contrôlant la minorité d'organismes bio-agresseurs est difficile compte tenu du nombre de facteurs qui impactent les organismes du sol dans le contexte agricole (Van der Putten *et al.*, 2006; Barrios, 2007; Collange *et al.*, 2011; Tsiafouli *et al.*, 2015). Évaluer le bio-fonctionnement du sol n'est pas trivial, toutefois un groupe d'organismes est particulièrement utile comme bio-indicateur du fait de ses caractéristiques -ubiquité, abondance et grande diversité fonctionnelle- ce sont les nématodes du sol (Villenave *et al.*, 2013; Mekonen *et al.*, 2017; van den Hoogen *et al.*, 2019).

Le rôle clé des nématodes dans le fonctionnement du sol et leur ubiquité (4 organismes sur 5 présents sur Terre sont des nématodes) font de ces organismes des outils de bio-indication particulièrement pratiques à utiliser dans le contexte agricole (Villenave *et al.*, 2009; Villenave *et al.*, 2011; Coll *et al.*, 2012; Djigal *et al.*, 2012; du Preez *et al.*, 2018). Les nématodes constituent un groupe extrêmement diversifié (plus de 25 000 espèces décrites) et sont présents dans tous les milieux (sols, eaux douces, océans) sur la totalité de la planète (Hodda *et al.*, 2009). En agriculture, les nématodes sont le plus souvent appréhendés comme des « ennemis » (ravageurs et responsables de dégâts sur les cultures). En effet, certaines espèces de nématodes sont parasites des plantes et sont responsables d'importantes pertes de production sur les cultures agricoles (Nicol *et al.*, 2011; Singh *et al.*, 2015); leur contrôle est difficile et, suite à l'interdiction de nombreux nématicides chimiques couramment utilisés dans les décades précédentes, il est nécessaire désormais de combiner un ensemble de pratiques qui leur sont défavorables pour empêcher leur prolifération sur les cultures sensibles.

Toutefois, la majorité des nématodes du sol vivent librement dans ce milieu et ne sont pas des parasites : ce sont les nématodes libres (Mulder et Vonk, 2011). Les espèces les plus abondantes de nématodes du sol n'ont pas d'activité parasitaire et sont nécessaires pour la réalisation des services de l'écosystème sol. Ces nématodes se nourrissent dans le sol de bactéries, ou de champignons ou d'autres organismes microscopiques, dont d'autres nématodes. Ainsi, depuis les années 1990, la nématofaune, i.e. l'ensemble des nématodes du sol, est utilisée comme bio-indicateur du fait de leur aptitude à renseigner sur différents aspects du fonctionnement biologique du sol : le niveau d'activité biologique, les voies de décomposition des matières organiques, l'intensité des flux de nutriments, la complexité des réseaux trophiques (Villenave *et al.*, 2008; Puissant *et al.*, 2021).

Afin de sensibiliser les acteurs de terrain de la filière agricole aux paramètres qui impactent la vie dans le sol des parcelles agricoles, aussi bien les organismes bénéfiques que

les bio-agresseurs, une application disponible en libre accès sur Internet a été développée : www.sipanema.fr. Cette application intègre les facteurs majeurs qui contrôlent l'abondance des nématodes du sol : la diversité végétale présente sur une parcelle (succession dans le temps intra- ou inter-annuelle et dans l'espace) ainsi que les pratiques agricoles (fertilisation, travail du sol, application de pesticides...). Cet outil a pour but de simuler, dans des parcelles agricoles, l'effet des pratiques agricoles sur (1) le fonctionnement biologique du sol et (2) la pression parasitaire liée aux nématodes phytoparasites. Deux risques, i.e. le risque sur le fonctionnement biologique (RFB) et le risque de pression parasitaire due aux nématodes phytoparasites (RPP), sont calculés à partir de la description des pratiques et de la diversité végétale présente sur la parcelle considérée. Cet article vise à présenter les informations utilisées et les principes des méthodes de calcul des risques de l'outil d'aide à la décision.

PRINCIPE DE FONCTIONNEMENT DE L'APPLICATION : UN OUTIL POUR PRÉDIRE L'EFFET DES PRATIQUES AGRICOLES SUR LES NÉMATODES DES SOLS

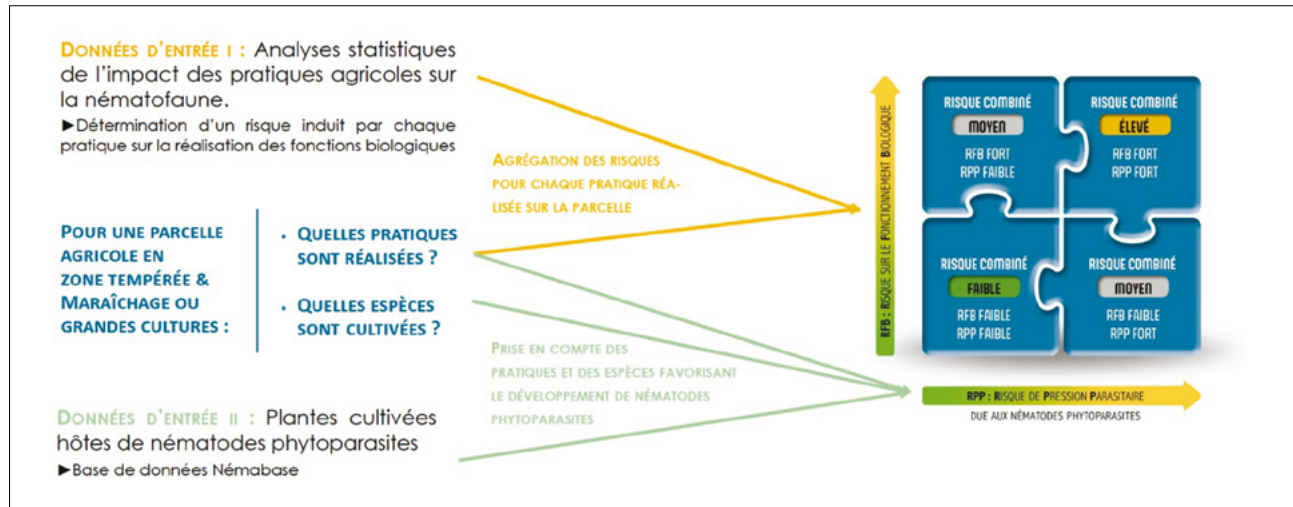
L'application se base sur la connaissance des nématodes du sol utilisés comme bio-indicateurs. Plus précisément, cette application a été développée à partir de deux ensembles de connaissances scientifiques : 1) les résultats quantitatifs d'une méta-analyse de Puissant *et al.* (2021) rassemblés dans la base de données META et 2) NEMABASE : <http://nemaplex.ucdavis.edu/Nemabase2010/Nemabase%20Search%20Menu.htm> (UC Davis Nemabase, 2010), une base de données sur les nématodes phytophages qui renseigne pour chaque espèce végétale les différents nématodes phytoparasites qui peuvent l'affecter, ainsi que les différents niveaux de résistance de la plante à ces nématodes (Figure 1).

Au travers d'un questionnaire, l'utilisateur renseigne, pour une parcelle agricole donnée de type « grandes cultures », la diversité végétale présente sur la parcelle (culture principale et autres espèces végétales de la rotation, diversité végétale utilisée en association ou en inter-cultures...), ainsi que les pratiques qui ont été et vont être mises en œuvre (concernant la fertilisation, le travail du sol, les produits phytopharmaceutiques, etc.). Pour chaque pratique, le questionnaire propose de choisir parmi une liste de possibilités figées (liste à choix multiple).

Un moteur de calcul utilise ces données fournies sur la conduite de la parcelle pour calculer deux risques : le risque sur le fonctionnement biologique (RFB) et le risque de pression parasitaire due aux nématodes phytoparasites (RPP). À l'issue des calculs, les résultats sont présentés sur le Sipanegrapphe,

Figure 1 : Représentation graphique du fonctionnement de SIPANEMA : les données d'entrées et de sorties de l'application. En jaune : les données scientifiques pour le calcul du RFB ; en vert : les données scientifiques pour le calcul du RPP ; en bleu : les données saisies pour l'utilisateur qui renseignent sur l'itinéraire technique de la parcelle étudiée.

Figure 1: Graphic representation of SIPANEMA operation: the input and output data of the application. In yellow: scientific data for the calculation of the RFB (risk based on biological functioning); in green: scientific data for the calculation of the RPP (risk of parasite pressure due to phytoparasitic nematodes); in blue: the data supplied by the user which provides information on the technical itinerary of the plot studied.



une représentation graphique qui expose les deux risques avec deux classes pour chacun d'eux :

- le risque sur le fonctionnement biologique du sol, qui peut être faible ou fort ;
- le risque de pression parasitaire due aux nématodes phytoparasites, qui peut être faible ou fort.

ÉVALUATION DE L'EFFET DES PRATIQUES SUR LES PARAMÈTRES DE LA NÉMATOFAUNE

Les facteurs et les paramètres nématofauniques étudiés

Les données recueillies dans la méta-analyse (Puissant *et al.*, 2021) ont été utilisées pour le calcul du RFB. Au sein des 500 publications scientifiques internationales caractérisant la réponse de la nématofaune aux pratiques agricoles, 103 articles ont été exploités car les résultats incluaient à la fois l'effet des pratiques en comparaison à un témoin pertinent et les résultats moyens ainsi que les écarts à la moyenne pour chaque paramètre étudié. 1 338 observations ont été extraites de ces articles et exploitées statistiquement. La réponse des nématodes aux différentes « familles » de pratiques agricoles suivantes

(Tableau 1) a été quantifiée : diversité végétale, fertilisation, travail du sol, pesticides ; l'effet « système de culture » dans son ensemble a aussi été évalué : agriculture conventionnelle *versus* agriculture biologique *versus* agriculture de conservation.

Cette étude a permis la quantification de l'effet des différentes pratiques par rapport à son témoin sur chacun des 11 paramètres de caractérisation de la nématofaune. Pour chacun de ces paramètres, le lien entre le sens de variation et la signification en termes de fonctionnement du sol est connu et a été explicité, de façon simplifiée, comme indiqué dans le tableau 2.

Les effets des pratiques sur les paramètres nématofauniques ont été évalués par le calcul des effect-size pour chaque pratique évaluée (Viechtbauer, 2010). Les effect-size convertis en pourcentage de variation par rapport au témoin sont représentés sur la figure 2. La description détaillée des méthodes, les effectifs des observations et les résultats sont disponibles dans la publication de Puissant *et al.* (2021).

Les effets des pratiques sur les nématodes

Effets de la diversité végétale sur la nématofaune

L'étude montre qu'une rotation de cultures induit une diminution de l'abondance absolue des nématodes phytophages de 47 % (Figure 2). Cet effet est d'autant plus important que la rotation est longue, supérieure à 3 ans. Cela permet également d'augmenter la diversité des organismes présents dans le sol. En

Tableau 1 : Les différentes familles de pratiques et pour chacune d'elle, la pratique considérée comme leur témoin respectif.**Table 1:** The different categories of agricultural practices and for each of them, the practice considered as their respective control.

Famille	Pratique étudiée	Description	Témoin
Diversité végétale	Rotation des cultures	Changement d'espèce principale d'une année sur l'autre (sur deux années ou plus)	Effet de cette pratique par rapport à une monoculture
	Association de cultures	Présence simultanée de deux (ou plus) espèces de plantes différentes	Effet de cette pratique par rapport à une culture monospécifique
	Culture intermédiaire	Présence d'une culture entre deux cultures principales (par exemple, couvert végétal en hiver, entre deux cultures de printemps).	Effet de cette pratique par rapport à un sol nu
Fertilisation	Fertilisation organique	Apport de matière organique, sous des formes variées : fumier, lisier, compost, résidus de culture, boues ...	Effet de cette pratique par rapport à aucun apport de fertilisant
	Fertilisation minérale	Apport d'azote et/ou phosphore et/ou potassium, sous différentes formes minérales telles que : NaNO_3 , NH_4NO_3 , $(\text{NH}_4)_3\text{PO}_4$...	
Travail du sol	Labour conventionnel	Retournement du sol sur 20 cm ou plus	Effet de cette pratique par rapport à aucun travail du sol
	Travail de conservation	Travail du sol superficiel sur moins de 20 cm, sans retournement	
Pesticides	Herbicides	Utilisation de produits herbicides	Effet de cette pratique par rapport à aucun apport de pesticides
	Nématicides	Utilisation de produits nématicides (avec ou sans autre biocide)	
	Biocides	Utilisation de produits biocides en général (sauf nématicides) : fongicide, bactéricides, insecticides ...	
Système	Conservation	Les piliers de l'agriculture de conservation sont le non labour, la couverture végétale des sols et la réduction des pesticides.	Effet de ce système de culture par rapport à un système conventionnel (utilisant pesticides, fertilisants minéraux, labour du sol)
	Biologique	L'agriculture biologique interdit l'usage de fertilisants minéraux et pesticides de synthèse.	

revanche, il y a peu d'effets de la présence de plusieurs cultures en association sur les 11 paramètres de la nématofaune évalués. Enfin, la présence de cultures intermédiaires, quelles qu'elles soient, en réduisant la période de sol nu, est très favorable à une plus forte activité biologique : elle favorise l'abondance de tous les groupes trophiques de nématodes et plus particulièrement les bactériovores et les herbivores.

Effets de la fertilisation

La fertilisation minérale n'impacte pas l'abondance des nématodes (*Figure 2*). En revanche, elle conduit à la diminution de la diversité et elle conduit également, sans surprise, à l'augmentation des indicateurs des flux de nutriments (en particulier l'Indice d'Enrichissement). La fertilisation organique induit une forte augmentation de l'abondance des bactériovores et des fongivores (respectivement 113 % et 141 % dans l'étude), mais également des omni-prédateurs. De plus, elle tend à augmenter la diversité ainsi que les indicateurs des flux de nutriments (en particulier l'Indice d'Enrichissement). La

fertilisation organo-minérale (mixte) entraîne une augmentation de l'abondance des nématodes omni-prédateurs mais réduit légèrement la diversité fonctionnelle (SI).

Effets du travail du sol

Le travail du sol (labour et travail superficiel sans retournement) diminue l'abondance des nématodes omni-prédateurs (*Figure 2*). Ces organismes sont reconnus comme sensibles aux perturbations physiques. La diversité est également impactée négativement, mais dans une faible mesure. Le labour conventionnel (> 20 cm) réduit la structure du réseau trophique de 26 %.

Effets de l'application de pesticides

Les apports de pesticides, en particulier de nématicides, diminuent la structure du réseau trophique et favorisent les taxons à multiplication rapide (*Figure 2*). Les nématicides (molécules qui sont maintenant interdites dans l'Union européenne) affectent négativement l'abondance de tous les groupes trophiques

Tableau 2 : Les différents paramètres de la nématofaune, leurs significations et leurs valeurs optimales.**Table 2:** *The different parameters of nematofauna, their meanings and their optimal values.*

Nom complet de l'indice	Signification	Valeur optimale
Abondance totale de nématodes	Somme de l'ensemble des nématodes présents dans le sol (tous groupes trophiques confondus). Exprimé en individus par kg de sol sec.	Maximum : le plus le mieux
Abondance des nématodes bactériovores	Nombre de nématodes appartenant aux différents groupes trophiques de nématodes. Exprimé en individus par kg de sol sec.	Maximum : le plus le mieux
Abondance des nématodes fongivores		Maximum : le plus le mieux
Abondance des nématodes omni-prédateurs		Maximum : le plus le mieux
Abondance des nématodes phytophages		Minimum : le moins le mieux
Indice d'enrichissement (EI)		Représente la réponse d'un écosystème à un enrichissement en ressources, à travers la proportion des guildes fonctionnelles connues pour être opportunistes. Plus cet indice est élevé, plus les flux de nutriments sont importants.
Indice de structure (SI)	Représente la stabilité et la complexité biologique d'un écosystème en s'appuyant sur les guildes fonctionnelles les plus sensibles. Plus il est élevé, plus le sol présente une chaîne trophique complexe.	Maximum : le plus le mieux
Richesse taxonomique (S)	Représente le nombre de genres (ou autres taxons) présents	Maximum : le plus le mieux
Indice de diversité de Shannon (H')	Représente l'équilibre de répartition entre les différentes espèces présentes dans un échantillon. Exemple : cas n°1 = • • • ♦ ○ / cas n°2 = ♦ ♦ • • Le cas n°1 présente un S plus élevé mais un H' plus faible que le cas n°2.	Maximum : le plus le mieux
Indice de maturité (MI)	Moyenne pondérée portant sur les nématodes libres, basée sur les classes colonisateurs-persistants représentant les stratégies démographiques des nématodes. Plus il est élevé, plus le milieu est stable.	Maximum : le moins le mieux
Indice de phytophages (PPI)	Moyenne pondérée portant sur les nématodes phytophages, basée sur les classes colonisateurs-persistants représentant les stratégies démographiques des nématodes. Plus il est élevé, plus la communauté de phytoparasites est susceptible de créer des dégâts sur les plantes cultivées	Maximum : le moins le mieux

de plus de 30 % en moyenne. Enfin, l'utilisation d'herbicides (différentes molécules actives confondues) a peu d'effet à cette échelle globale.

Synthèse et effets du système de culture

Si on considère l'effet moyen des pratiques sur la nématofaune (intégration de l'ensemble des paramètres de la nématofaune), les pratiques qui ont le plus d'impact sont, par ordre décroissant :

- une fertilisation mixte (minérale + organique) : effets positifs,
- la présence d'inter-cultures : effets positifs,
- l'application de nématicides : effets négatifs,
- la fertilisation organique : effets positifs,
- l'application de pesticides (hors nématicides et herbicides) : effets négatifs,
- la réalisation d'une rotation : effets positifs,
- le travail du sol : effets négatifs.

A contrario, les pratiques ayant montré le moins d'influence sur les paramètres biologiques sont :

- les herbicides,

- l'association de cultures,
- la fertilisation minérale.

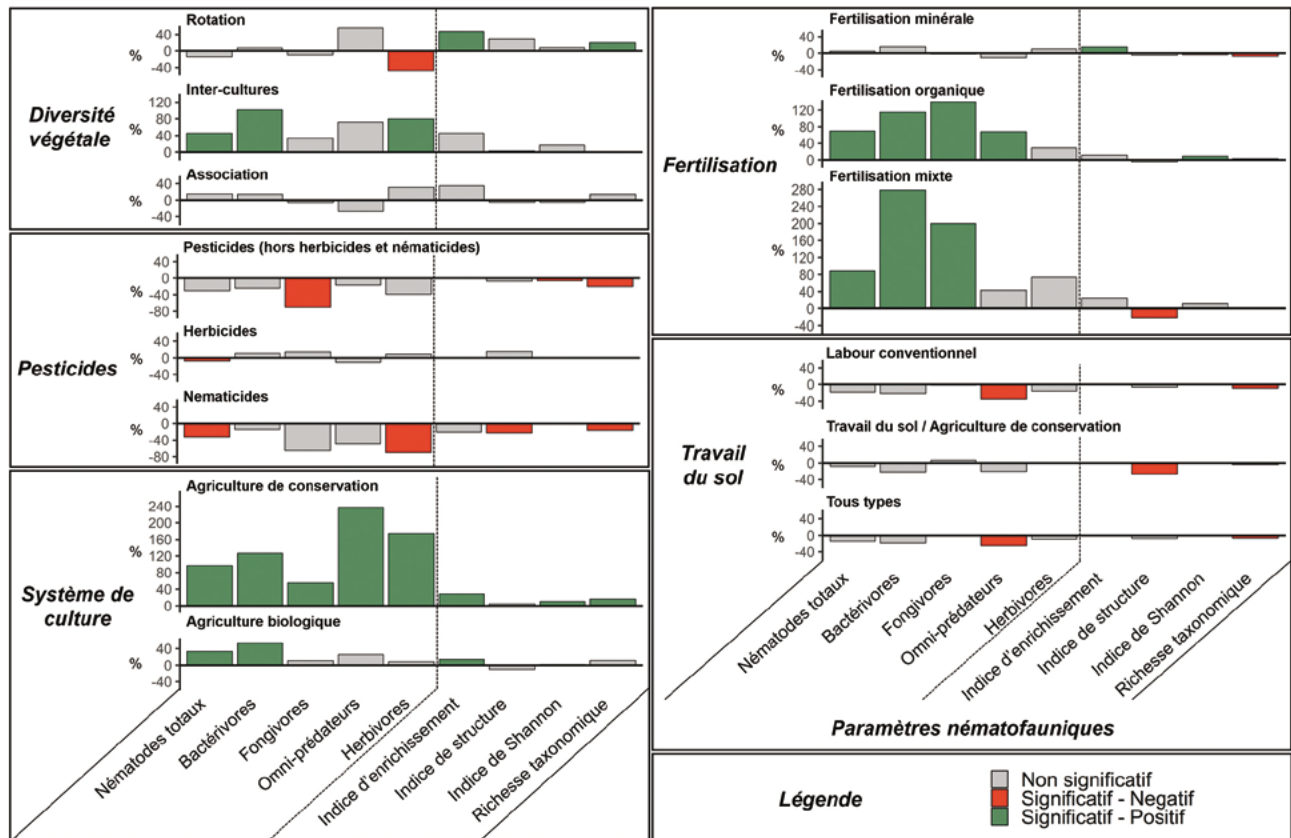
Le système de culture « agriculture de conservation » a un impact nettement plus positif sur les paramètres de la nématofaune que celui de l'agriculture biologique, qui a cependant également un effet positif (*Figure 2*).

LE CALCUL DU RFB : RISQUE SUR LE FONCTIONNEMENT BIOLOGIQUE

Pour calculer ce risque, SIPANEMA modélise l'impact des pratiques agricoles sur la nématofaune du sol en se basant sur les résultats présentés précédemment. Ainsi, en sachant quelles pratiques affectent quels paramètres de nématodes, l'effet d'un itinéraire technique complet sur le fonctionnement biologique d'une parcelle est calculé.

Figure 2 : Effet (en pourcentage ; significatif au seuil de 5 %) de la diversité végétale, de la fertilisation, des pesticides, du travail du sol et du système de culture par rapport à la pratique « témoin » respective sur les 9 paramètres majeurs de la nématofaune.

Figure 2: Effect (in percentage) of plant diversity, fertilization, pesticides, tillage and the cropping system compared to the respective "control" practice on the 9 major nematofauna parameters.



Effet de chaque pratique sur le fonctionnement biologique

Effet sur chaque paramètre nématofaunique

Dans la méta-analyse, les effets des pratiques agricoles sur les paramètres nématofauniques sont représentés par une valeur de significativité (p-value) de l'effet observé, et une valeur de taille de l'effet (size effect). Le size effect quantifie l'effet de la pratique sur l'indice. L'ensemble des effets dont le size effect est important selon l'échelle décrite par Cohen¹ (Cohen *et al.*, 1988) et/ou dont la p-value est significative au seuil de 90 % ont été conservés. Ce choix d'exploiter les effets dont la p-value n'est pas significative mais l'effet est important est adapté pour une démarche d'évaluation d'un risque, i.e. en prenant en compte les effets importants même s'ils ont peu de chances de se produire.

1) Est considéré comme important un size effect supérieur à 0.2 ou inférieur à -0.2.

Effet cumulé sur l'ensemble des paramètres nématofauniques

Le *tableau 2* précise le sens de variation des paramètres de la nématofaune en relation avec le fonctionnement biologique : pour une majorité de paramètres, une augmentation est synonyme de meilleur fonctionnement biologique ; pour d'autres c'est l'inverse et parfois une relation plus complexe est retenue.

En agrégeant, pour chaque pratique, l'augmentation ou la diminution du risque en lien avec les paramètres nématofauniques, un risque est calculé pour chaque pratique.

$$RFB_{Pratique1} = \frac{\sum |SE_j| \times P_{j,1} - \sum |SE_i| \times P_{i,1}}{\sum P_{i,1} + P_{j,1}}$$

SE_j = Size effect pour un paramètre j que la pratique 1 éloigne de son optimal

SE_i = Size effect pour un paramètre i que la pratique 1 rapproche de son optimal

P_(i,1) = Pondérateur associé à l'indicateur i et la pratique 1 = P₁.

Dans cette version du modèle $P_{i,1}$ et $P_{j,1}$ valent 1 quels que soient la pratique et le paramètre nématofaunique. Toutefois, nous avons gardé la possibilité de faire évoluer cette formule dans des versions ultérieures du simulateur en intégrant des valeurs variables pour ce pondérateur. Un risque a été calculé pour chaque pratique selon cette méthode (Figure 3).

Agrégation des risques de chaque pratique

Pour synthétiser les risques des pratiques sur une parcelle en un seul risque global, la somme des risques liés aux différentes pratiques pondérés est réalisée selon la formule suivante :

$$\text{RisqueFonctionnementBio}_{\text{Total}} = \sum \text{RFB}_{\text{Pratique}_i} \times P2_i$$

$P2_i$ = Pondérateur associé à la pratique i , variant entre 0 et 1, pour la qualifier par rapport à sa version « idéale », c'est-à-dire cette pratique réalisée de la façon qui est la plus favorable à l'activité biologique bénéfique du sol.

Pour chaque pratique, chaque valeur possible dans les listes de choix multiples a été associée, à dire d'expert, à une valeur pour $P2$ comprise entre 0 et 1. Les pondérateurs $P2$ sont déduits des données saisies dans le questionnaire : la note calculée pour chaque pratique est pondérée en fonction du niveau de la pratique réalisée sur la parcelle renseignée par l'utilisateur.

Il a été choisi d'évaluer le risque sur le fonctionnement biologique en 2 classes : risque fort et risque faible. Pour cela, une valeur seuil a été définie entre les 2 classes. La détermination du seuil a été réalisée grâce à un référentiel de 70 scénarios (70 parcelles avec des pratiques associées) pour lesquels un risque avait déjà été déterminé par des experts en nématologie.

LE CALCUL DU RPP : RISQUE DE PRESSION PARASITAIRE DUE AUX NÉMATODES PHYTOPARASITES

Nemabase (Université de Davis, Californie, USA) est la base de données sur les nématodes herbivores qui a été utilisée pour permettre le calcul du risque de pression parasitaire due aux nématodes phytoparasites (RPP). Elle recense 53 000 observations issues de publications scientifiques sur les liens entre 1 000 espèces de nématodes phytophages et 6 400 espèces de plantes. Cette base liste les différents nématodes qui peuvent affecter quasiment toutes les espèces végétales d'intérêt agronomique, ainsi que les différents niveaux de résistance de la plante à ces nématodes (UC Davis Nemabase, 2010). Le risque de pression parasitaire sur une parcelle donnée est calculé à l'aide des informations extraites de Nemabase et de la connaissance des espèces de plantes présentes sur la parcelle au cours de la rotation (questionnaire rempli par l'utilisateur). Le risque se calcule comme la somme de trois composantes indépendantes.

Les trois composantes sont calculées à partir des règles suivantes :

1- La culture principale est-elle une culture à risque (oui ou non) ?

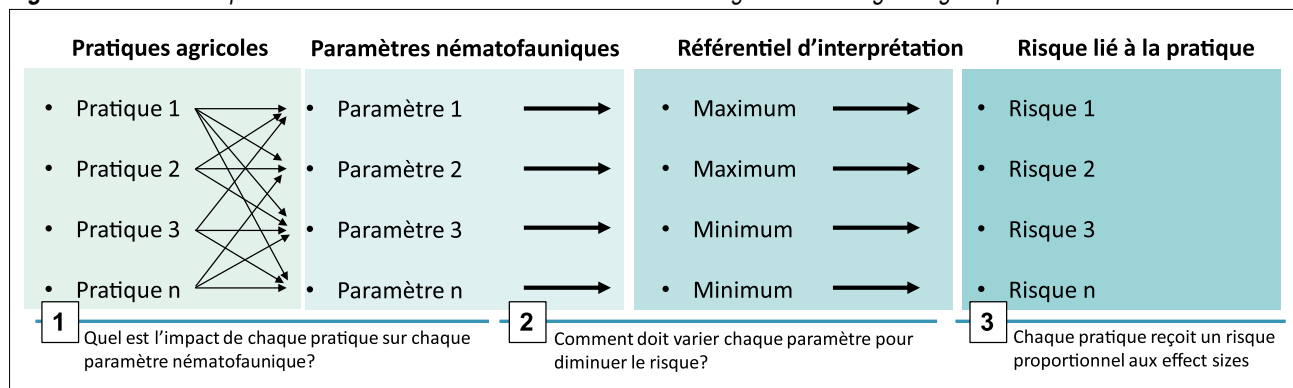
Si cette plante fait partie des cultures particulièrement sensibles, le risque associé par cette parcelle augmente. La liste des plantes considérées comme particulièrement sensibles aux attaques de nématodes est fixée à une vingtaine de plantes dans SIPANEMA (dont par exemple la tomate ou la pomme de terre).

2- Combien de genres de nématodes phytoparasites majeurs (=susceptibles de créer des dommages) affectent la culture principale ?

Chaque nématode de la liste des nématodes critiques pour lesquels la culture principale est sensible contribue à

Figure 3 : Représentation schématique de l'attribution d'un risque sur le fonctionnement biologique pour une pratique donnée.

Figure 3: Schematic representation of the attribution of a risk based on biological functioning for a given practice.



l'augmentation du risque. Les genres de nématodes majeurs, connus pour causer les plus grandes pertes de rendements dans les cultures tempérées, retenus dans SIPANEMA pour ce calcul, sont au nombre de 12 (dont les plus critiques sont *Meloidogyne*, *Globodera*, *Pratylenchus*, *Heterodera*, *Ditylenchus*). Les informations utilisées ici sont au niveau du genre de nématodes.

3- Existe-t-il des espèces de nématodes phytoparasites pour lesquelles toutes les plantes présentes au cours de la rotation (cultures principales / cultures associées / inter-cultures) sont hôtes ?

Le risque de pression parasitaire augmente si plusieurs plantes parmi celles cultivées sur la parcelle sont sensibles à au moins une espèce de nématodes phytoparasites. Les informations utilisées ici sont au niveau de l'espèce de nématodes. En effet, le cycle de reproduction de cette espèce de nématodes pourra dans ce cas être réalisée grâce aux différentes espèces végétales hôtes présentes au cours de la rotation.

Il a été choisi d'évaluer le risque de pression parasitaire due aux nématodes phytoparasites en 2 classes : risque fort et risque faible. Pour cela, une valeur seuil a été définie à dire d'expert.

Le risque de pression parasitaire n'est pas uniquement dépendant des espèces végétales présentes sur la parcelle, mais il est également impacté par l'ensemble des pratiques réalisées sur cette parcelle. En effet, selon la méta-

analyse, les pratiques peuvent influencer certains indices nématofauniques liés à la pression parasitaire. Pour prendre cela en compte, un risque de pression parasitaire lié aux pratiques est calculé en utilisant une méthode similaire à celle employée pour calculer le risque sur le fonctionnement biologique. Une sélection de paramètres nématofauniques, différente de celle utilisée pour l'effet sur le fonctionnement biologique, a été réalisée pour ce calcul : l'abondance des omni-prédateurs, l'abondance des phytophages, l'Indice de Structure (SI) et l'Indice des Parasites des Plantes (PPI) sont utilisés. Le résultat de ce calcul de risque est présenté sous forme d'un commentaire associé au graphe présentant les valeurs pour les deux risques. Il n'est pas intégré au calcul du RPP lui-même.

PRÉSENTATION DES RÉSULTATS DANS L'APPLICATION SIPANEMA

Cette application a été développée plus spécifiquement dans le contexte des grandes cultures et est en accès libre sur Internet. Elle donne accès au calculateur de risque ainsi qu'à des informations générales sur l'outil. Elle rappelle ce que sont les nématodes, leur potentiel de bio-indicateurs et le caractère de ravageur de la catégorie des phytoparasites. L'application fournit également des indications sur les méthodes de calcul des risques qui sont représentées sur un graphique de résultat

Figure 4 : Signification des 2 classes pour chacun des deux risques calculés par l'outil Sipanema : le risque sur le fonctionnement biologique (RFB) et le risque de pression parasitaire due aux nématodes phytoparasites (RPP).

Figure 4: Meaning of the 2 classes for each of the two risks calculated by the Sipanema tool: the risk on biological functioning (RFB) and the risk of parasite pressure due to phytoparasitic nematodes (RPP).

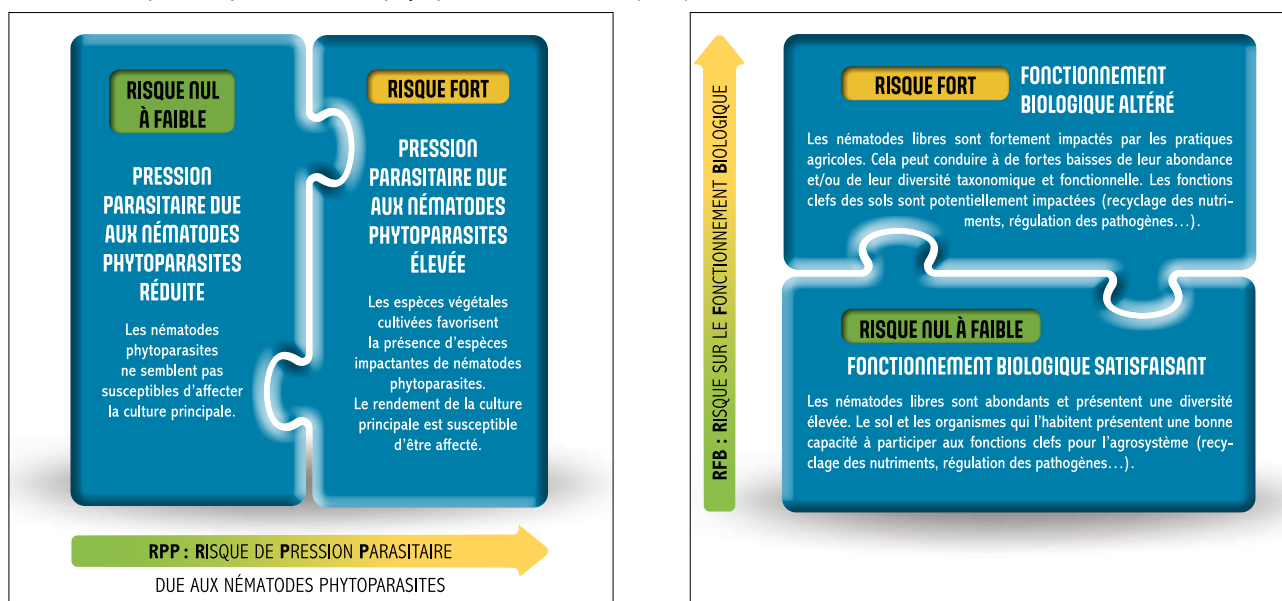
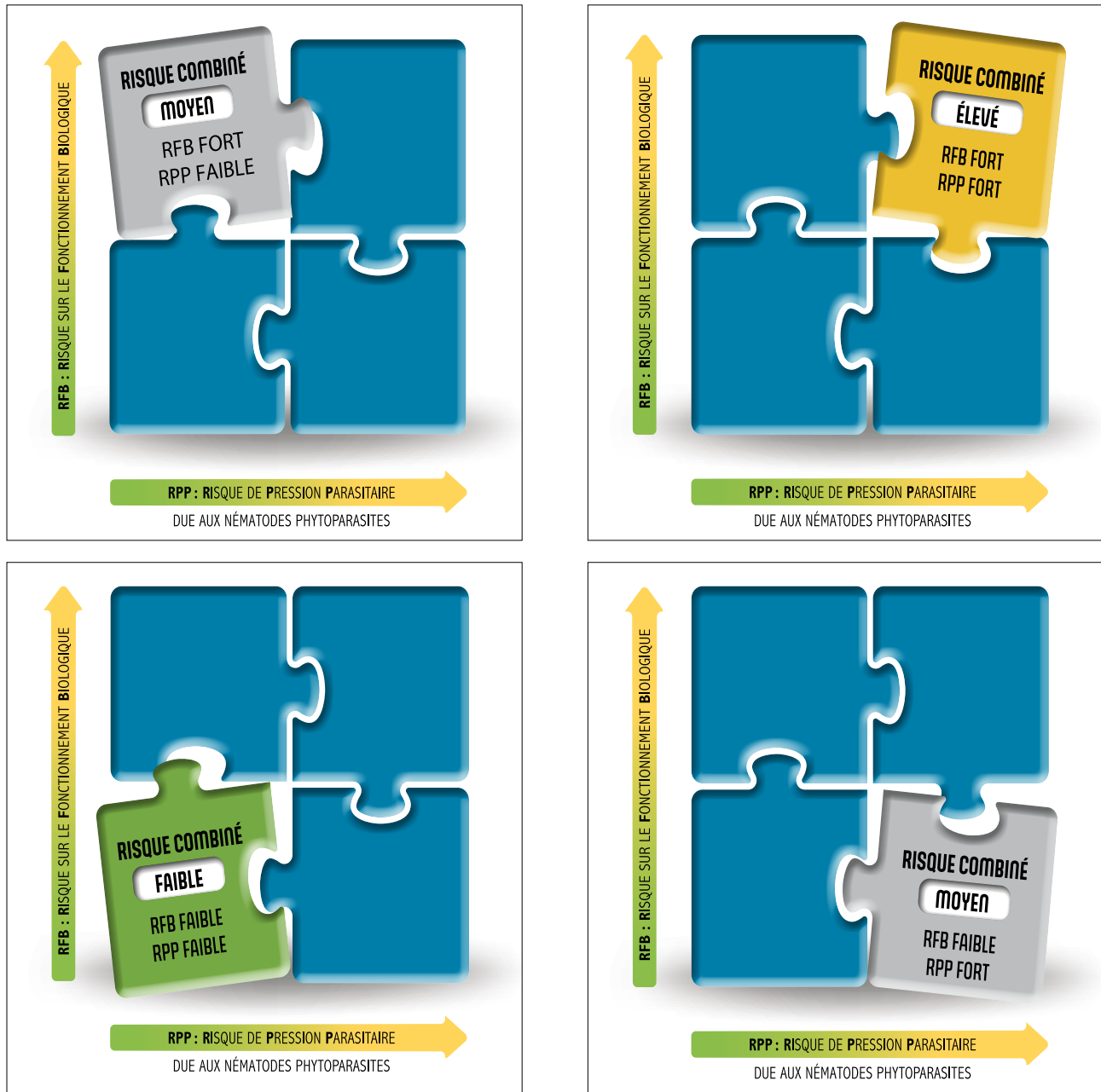


Figure 5 : Les 4 résultats possibles affichés sur le Sipanegrphe.
Figure 5: The 4 possible results displayed on the Sipanegrphe.



nommé le « Sipanegrphe » qui présente le RPP sur l'axe des abscisses et le RFB sur l'axe des ordonnées (Figure 4).

Le sipanegrphe présente la combinaison des deux risques, soit quatre résultats possibles (Figure 5) : classifié en

- risque combiné faible : le RFB et le RPP sont faibles,
- risque combiné moyen : le RFB est faible et le RPP est fort ou, le RFB est fort et le RPP est faible,
- risque combiné fort : le RFB et le RPP sont forts.

Des commentaires sont automatiquement insérés à côté du Sipanegrphe pour expliciter la situation rencontrée. C'est à ce stade de l'analyse que l'application est un outil d'aide à la décision qui donne des recommandations d'analyses de sol en lien avec l'interprétation des résultats obtenus lors de la simulation. L'application permet, de plus, de comparer différents scénarios pour une même parcelle en donnant la possibilité de reprendre un scénario et de faire des modifications sur l'itinéraire

technique afin de déterminer l'effet de ces changements sur les risques calculés.

Le questionnaire pour renseigner les pratiques est ergonomique et rapide à remplir; toutes les informations demandées sont utilisées pour calculer les risques. Des informations plus détaillées potentiellement utiles pour une évaluation plus précise, telles que la localisation géographique et les caractéristiques du sol ne sont pas intégrées dans cette version, bien que ces éléments soient potentiellement impactants.

CONCLUSION

SIPANEMA est un outil d'aide à la décision en accès libre sur Internet (www.sipanea.fr) se basant sur des connaissances scientifiques. Cette application permet de sensibiliser les utilisateurs sur les rôles joués par les nématodes et les pratiques qui sont susceptibles d'impacter la qualité des sols et la santé des plantes. SIPANEMA permet d'estimer rapidement les risques de pression parasitaire et de perte du fonctionnement biologique et, pour une parcelle, d'enregistrer et de comparer différents scénarios agronomiques par l'utilisateur. Cette application n'a pas vocation à remplacer les analyses biologiques de sols réalisées par les laboratoires, qui sont la seule méthode quantitative pour caractériser le fonctionnement biologique et la présence des parasites. En effet, l'application se situe en amont d'un processus de suivi de la qualité des sols. Elle a pour objectif de sensibiliser les praticiens à des paramètres de gestion des parcelles pour concevoir des itinéraires techniques favorables à la biodiversité des sols et ses fonctions.

REMERCIEMENTS

L'étude a été financée par l'Office Français de la Biodiversité (OFB N°308509/00), dans le cadre du projet IPANEMA de l'appel à projets « Pratiques agro-écologiques et itinéraires techniques favorables à la biodiversité des sols et ses fonctions ».

BIBLIOGRAPHIE

Barrios E., 2007 - Soil biota, ecosystem services and land productivity. *Ecological Economics* 64, 269-285.

Cohen J. 1988 - *Statistical Power Analysis for the Behavioral Sciences*. Routledge. ISBN 978-1-134-74270-7.

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.

Collange B., Navarrete M., Peyre G., Maitelle T., Tchamitchian M., 2011 - Root-knot nematode (*Meloidogyne*) management in vegetable crop production: The challenge of an agronomic system analysis. *Crop Protection* 30, 1251-1262.

Djigal D., Chabrier C., Duyck P.F., Achard R., Queneherve P., Tixier P., 2012 - Cover crops alter the soil nematode food web in banana agroecosystems. *Soil Biology & Biochemistry* 48, 142-150.

du Preez G.C., Daneel M.S., Wepener V., Fourie H., 2018 - Beneficial nematodes as bioindicators of ecosystem health in irrigated soils. *Applied Soil Ecology* 132, 155-168.

Gobat J.M., Aragno M., Matthey W., 2004 - *The Living Soil: Fundamentals of Soil Science and Soil Biology*, U.S.

Hodda M., Peters L., Traunspurger W., 2009 - Nematode diversity in terrestrial, freshwater aquatic and marine systems. *Nematodes as environmental indicators*. CABI Publishing, Wallingford, UK, 45-94.

Mekonen S., Petros I., Hailemariam M., 2017 - The role of nematodes in the processes of soil ecology and their use as bioindicators. *Agriculture and Biology Journal of North America* 8, 132-140.

Mulder C., Vonk J.A., 2011 - Nematode traits and environmental constraints in 200 soil systems: scaling within the 60–6000 µm body size range. *Ecology* 92, 2004-2004.

Nicol J.M., Turner S.J., Coyne D., Den Nijs L., Hockland S., Maafi Z.T., 2011 - Current nematode threats to world agriculture, Genomics and molecular genetics of plant-nematode interactions. Springer, pp. 21-43.

Puissant J., Villenave C., Chauvin C., Plassard C., Blanchart E., Trap J., 2021 - Quantification of the global impact of agricultural practices on soil nematodes: A meta-analysis. *Soil Biology and Biochemistry* 161, 108383.

Singh S., Singh B., Singh A., 2015 - Nematodes: a threat to sustainability of agriculture. *Procedia Environmental Sciences* 29, 215-216.

Tsiafouli M.A., Thébault E., Sgardelis S.P., De Ruiter P.C., Van Der Putten W.H., Birkhofer K., Hemerik L., De Vries F.T., Bardgett R.D., Brady M.V., 2015 - Intensive agriculture reduces soil biodiversity across Europe. *Global Change Biology* 21, 973-985.

UC Davis Nemabase, 2010 - A Database of the Host Status of Plants to Nematodes. Last update 27 August 2014, Agriculture and Natural Resources, University of California. Electronically accessible. Available from: <http://ipm.ucanr.edu/NEMABASE/nemabasefull.html>

van den Hoogen J., Geisen S., Routh D., Ferris H., Traunspurger W., Wardle D.A., De Goede R.G., Adams B.J., Ahmad W., Andriuzzi W.S. *et al.*, 2019 - Soil nematode abundance and functional group composition at a global scale. *Nature* 572, 194-198.

Van der Putten W., Cook R., Costa S., Davies K., Fargette M., Freitas H., Hol W., Kerry B., Maher N., Maitelle T., 2006 - Nematode interactions in nature: models for sustainable control of nematode pests of crop plants? *Advances in agronomy* 89, 227-260.

Viechtbauer W., 2010 - Conducting meta-analyses in R with the metafor package. *Journal of Statistical Software* 36, 1-48.

Villenave C., Djigal D., Blanchart E., Ratnadass A., Chotte J.-L., Rabary B., 2008 - Les nématodes, reflet du fonctionnement biologique des sols en semis direct sous couverture végétale. *Terre malgache* 26, 47-50.

Villenave C., Jimenez A., Guernion M., Pérès G., Cluzea D., Maitelle T., Martiny B., Fargette M., Tavoillot J., 2013 - Nematodes for soil quality monitoring: results from the RMQS BioDiv programme.

Villenave C., Rabary B., Chotte J.-L., Blanchart E., Djigal D., 2009 - Impact of direct seeding mulch-based cropping systems on soil nematodes in a long-term experiment in Madagascar. *Pesquisa Agropecuaria Brasileira* 44, 949-953.

Villenave C., Saj S., Attard E., Klumpp K., Le Roux X., 2011 - Grassland management history affects the response of the nematode community to changes in above-ground grazing regime. *Nematology* 13, 995-1008.

