**AFPP – CINQUIÈME CONFÉRENCE INTERNATIONALE
SUR LES MÉTHODES ALTERNATIVES DE PROTECTION DES PLANTES
LILLE – 11 AU 13 MARS 2015**

LE PROJET GEDUNEM : INNOVATIONS TECHNIQUES ET VARIÉTALES POUR UNE GESTION DURABLE & INTÉGRÉE DES NÉMATODES À GALLES DANS LES SYSTÈMES MARAÎCHERS SOUS ABRIS

C. Djian-Caporalino[(1)], A. Fazari[(1)], N. Marteu[(1)], M. Navarrete[(2)], A. Dufils[(2)], M. Tchamitchian[(2)], C. Furnion[(2)], A. Lefèvre[(?)], L. Pares[(?)], T. Mateille[(5)], J. Tavoillot[(?)], A. Palloix[(3)], A-M. Sage-Palloix[(3)], H. Védie[(?)], C. Goillon[(?)], I. Forest[(?)], P. Castagnone-Sereno[(1)]

[(1)] INRA PACA, UMR 1355, Institut Sophia Agrobiotech, 400 route des Chappes, 06903 Sophia Antipolis cedex <caroline.caporalino@sophia.inra.fr>
[(2)] INRA PACA, UR0767, Ecodéveloppement, site Agroparc, 84914 Avignon cedex 09 <mireille.navarrete@avignon.inra.fr>
[(3)] INRA PACA, UR1052, Génétique et Amélioration des Fruits et Légumes, Domaine Saint-Maurice, 84143 Montfavet Cedex 09 <Alain.Palloix@avignon.inra.fr>
[(4)] INRA Montpellier, UE0411, Sciences pour l'Action et le Développement, Domaine Expérimental de Alénya Roussillon, 66200 Alénya <lefevrea@supagro.inra.fr>
[(5)] IRD, UMR CBGP, 755 Avenue du Campus de BaillarguetAgropolis, 34988 Montferrier Sur Lez Cedex <thierry.mateille@ird.fr>
[(6)] GRAB, Groupe de Recherche en Agriculture Biologique, 84 911 Avignon Cedex 9 <helene.vedie@grab.fr>
[(7)] APREL, Association Provençale de Recherche et d'Expérimentation Légumière, Route de Mollégès, 13210 Saint-Rémy de Provence <goillon@aprel.fr>
[(8)] Chambre d'agriculture du Var, 727 avenue Alfred Décugis, 83400 Hyères <isabelle.forest@var.chambagri.fr>

RÉSUMÉ *(10 lignes)*
Pour augmenter la durabilité de la protection contre les nématodes à galles (un problème majeur en cultures maraîchères en conditions méditerranéennes), le projet GEDUNEM évalue des stratégies de gestion basées sur la combinaison de résistances génétiques et de pratiques culturales (rotations de cultures de plantes sensibles, plantes résistantes et plantes de coupure ; gestion de l'interculture engrais verts "nématicides" ; solarisation…). Des approches multidisciplinaires ont été combinées dans un dispositif multi-site évalué sur 4 ans comprenant des systèmes de culture biologiques et conventionnels, dans des stations de recherche ou des exploitations agricoles du Sud de la France. Le projet évalue l'impact de ces diverses stratégies innovantes sur l'évolution des populations de nématodes à galles, le contournement des gènes de résistance, l'écologie du sol (autres nématodes et autres agents pathogènes), et l'acceptabilité des systèmes proposés par les agriculteurs.

Mots-clés : nématodes à galles, lutte intégrée, durabilité des résistances, pratiques culturales, gestion durable

ABSTRACT
The GEDUNEM project: Varietal and technical innovations for the sustainable and integrated management of root-knot nematodes in protected vegetable cropping systems
To increase the sustainability of the protection against root-knot nematodes (a major problem in vegetable crops in the Mediterranean area), the project GEDUNEM aims at assessing cropping strategies based on the combination of genetic resistance with cultivation practices (crop rotations including susceptible, resistant, and non-host plants, intercropping management such as "nematicidal" cover crops, solarisation). Multidisciplinary

approaches were combined in a multi-site device including organic and conventional cropping systems, in research stations and in commercial farms in the South of France. The project aims at assessing the impact of such innovative strategies on root-knot nematode populations, on resistance gene overcoming, on soil ecological diversity including other nematode species and pathogens, and on the acceptability by farmers of the cropping systems built.

Keywords: root-knot nematodes, integrated pest management, resistance gene durability, agronomic practices, sustainable management

INTRODUCTION

L'évolution récente de la législation européenne en matière d'homologation et d'usage des pesticides et l'objectif Ecophyto 2018 en France créent un contexte nouveau : dans les années à venir, les agriculteurs devront adopter à large échelle les principes de la protection intégrée en introduisant des méthodes de lutte alternatives leur permettant de réduire leur dépendance à l'usage des pesticides, mais ils ne disposent pas encore de moyens validés et efficaces dans de larges conditions pour le contrôle des nématodes (Collange *et al*, 2011). Or les systèmes maraîchers sous abri en France s'appuient principalement sur des rotations de cultures de laitue en période hivernale et cultures de solanacées (tomate, poivron, aubergine) ou de cucurbitacées (melons, concombres, courgettes) en été qui les rendent fragiles vis-à-vis des parasites telluriques (Fig. 1). Une enquête récente conduite par l'INRA en France, souligne l'importance particulière des nématodes à galles dans plus de 40% des exploitations conventionnelles et en agriculture biologique du Sud-Est (Djian-Caporalino, 2010) et l'inquiétude accrue des producteurs vis-à-vis d'espèces de quarantaine en Europe qui obligeraient à une jachère noire des parcelles touchées (Villeneuve et al, 2013). Suite à l'interdiction des nématicides chimiques, l'utilisation de variétés ou porte-greffes résistants est une voie en plein essor qui se heurte néanmoins à 3 contraintes majeures : (i) le nombre limité d'espèces végétales disponibles possédant des gènes de résistance aux nématodes à galles (tomate, poivron), (ii) l'émergence de populations de nématodes virulentes capables de contourner la résistance, et (iii) à l'inactivité de certains gènes (gène *Mi-1* de la tomate par exemple) lorsque les températures du sol sont supérieures à 30°C.

Pour gérer de manière durable les problèmes de nématodes et préserver les résistances sur le long terme, le projet GEDUNEM vise à élaborer et évaluer des stratégies de gestion pluriannuelles basées sur la combinaison de résistances génétiques et de pratiques culturales : rotations de cultures alternant plantes sensibles, plantes résistantes et plantes non-hôtes, utilisation d'engrais verts à action nématicide pendant l'interculture, solarisation... Des prototypes de systèmes de culture ont été construits en partenariat avec des conseillers techniques (Navarrete et al 2010). Le projet, prévu pour 4 ans (2012-2015), repose sur un réseau de 5 parcelles expérimentales, en station expérimentale ou chez des agriculteurs de la zone méditerranéenne (Sud de la France) et sur un dispositif d'enquêtes. Sur ces différents sites, 3 systèmes sont évalués sur des aspects à la fois analytiques et systémiques : évaluation de l'impact des stratégies mises en place sur les populations de nématodes à galles et sur la durabilité des résistances, sur l'écologie du sol (autres nématodes phytoparasites ou utiles, autres agents pathogènes) et étude de la faisabilité technique et de la viabilité agronomique. En parallèle, une enquête à permis d'évaluer l'acceptabilité de ces trois stratégies par les agriculteurs, en fonction du type d'exploitation et de la motivation des agriculteurs. La diversité des partenaires impliqués (chercheurs, expérimentateurs, producteurs, structures de développement) et l'approche multidisciplinaire adoptée permettra de fournir les bases nécessaires pour raisonner de manière poussée les démarches de sélection conduisant à l'obtention de variétés plus durablement résistantes et valorisant l'effet de stratégies intégrées (associant résistance variétale, interventions culturales, lutte biologique, etc.) sur l'efficacité et la durabilité des systèmes de protection.

Figure 1 : Dégâts de nématodes à galles sur culture de concombres et laitues sous abris (photos INRA). *Root-knot nematode damages on cucumber and lettuce crops under shelter (photo INRA)*



MATÉRIELS ET MÉTHODES

Les systèmes proposés

Trois prototypes de systèmes de culture ont été construits en partenariat avec des conseillers techniques (Tab. 1). Ils sont suivis sur 4 ans (2012-2015) sur un réseau de 5 parcelles, en station expérimentale ou chez des agriculteurs de la zone méditerranéenne (Sud de la France et Maroc) en agriculture biologique ou conventionnelle. Ces prototypes sont comparés à des rotations classiquement réalisées dans le Sud-Est de la France (cultures de solanacées [tomate, poivron] ou cucurbitacées [melon] en été et salades ou blettes en hiver) (témoins) selon les méthodologies de projets précédents (« Neoleg », « Sysbiotel », Djian-Caporalino *et al*, 2014). Outre l'utilisation de gènes de résistance contournables (tomate-*Mi*, poivron-*Me3*, les gènes étant affaiblis dans des fonds génétiques sensibles), les pratiques agronomiques suivantes sont testées: solarisation, plante de coupure (mâche), engrais vert sorgho biofumigant, engrais vert piège (piment hybride résistant combinant les gènes *Me1Me3*).
Les tomates-*Mi* sont des variétés commerciales portant le gène de résistance *Mi-1* qui contrôle les principales espèces de *Meloidogyne* de la zone Méditerranéenne (*M. incognita, M. arenaria, M. javanica*). Ce gène *Mi-1* peut être contourné par de fortes populations de *Meloidogyne* (Castagnone-Sereno, 2002). Les poivrons résistants contournables sont utilisés comme porte-greffes de variétés commerciales. Ces porte-greffes sont issus d'un rétrocroisement de la lignée HD149 (portant le gène majeur *Me3* à large spectre qui contrôle les 3 espèces de nématodes à galles) par la variété Doux Long des Landes (DLL, très sensible aux mêmes espèces de *Meloidogyne*), suivie d'une étape d'autofécondation. Le gène *Me3* introgressé dans la variété très sensible DLL est contournable (Barbary *et al*, 2014). Les piments hybrides résistants *Me1/Me3* utilisés comme engrais verts sont issus du croisement entre HD149 (*Me3*) et HD330 (*Me1*). *Me1* est également un gène majeur à large spectre qui contrôle les 3 principales espèces de *Meloidogyne*. On a déjà montré que ces piments hybrides *Me1Me3* n'étaient pas contournables et pouvaient être utilisées comme plantes-pièges pour réduire significativement les niveaux de populations de *Meloidogyne* dans le sol (Djian-Caporalino et al., 2014).

Tableau 1 : Systèmes de culture étudiés. *Cropping systems studied*

Proto type	Principe	Processus biologiques	Références bibliographiques	Questions de recherche
S1	Cultiver un engrais vert nématicide (variété de sorgho à haute teneur en dhurrine) en été, bâcher le sol après enfouissement.	Dégradation de la dhurrine en acide cyanhydrique (HCN), molécule biocide à large spectre	Widmer et Abawi 2002 ; Al Sultan 2003	Itinéraire technique du sorgho pour maximiser la production de HCN ; conditions de l'hydrolyse en HCN ; interaction avec la composition du sol
S2	Cultiver un engrais vert avec une espèce piège des nématodes (piment combinant 2 gènes de résistance)	Piégeage des larves J2, seul stade où les nématodes sont mobiles dans le sol	Djian-Caporalino *et al* 2014	Itinéraire technique pour optimiser l'occupation racinaire du sol et réduire les coûts
S3	Accroitre la diversité	Alternance	Kratochvil	Alternance optimale des

	cultivée et combiner plantes hôtes/non hôtes, sensibles/résistantes	d'espèces hotes et non hôtes pour réduire les populations	2004 ; Djian-Caporalino *et al* 2009	espèces et des techniques en fonction de la sensibilité des nématodes au climat

Système 1 : Une parcelle de 680 m² sise à Lambesc (13), naturellement infestée par *M. incognita*, est divisée en deux sous-parcelles dites « témoin » et « Traitée ». L'objectif de ce système (Tab. 1) est d'évaluer l'effet d'un engrais vert d'été (sorgho) avec un potentiel nématicide sur la durabilité d'une résistance contournable (gène *Me3* dans le fond génétique très sensible piment Doux Long des Landes). Le sorgho dit « nématicide » est un sorgho riche en dhurrine, précurseur de cyanure d'hydrogène (HCN), pour obtenir un effet biofumigation au moment de son enfouissement dans le sol. Il s'agit de la variété 270911, hybride 3 voies issu du croisement [Sorghom x Suden grass], en cours d'inscription au catalogue CTPS. Le sorgho standard est un Suden grass variété 'Piper' classiquement utilisé par les maraîchers.

Système 2 : Une parcelle de 250 m² sise à Six-Fours (84), naturellement infestée par *M. arenaria*, est divisée en deux sous-parcelles dites « témoin » et « Traitée » (Tab. 1). L'objectif de ce système est d'évaluer l'effet d'un engrais vert d'été (piment résistant hybride *Me1/Me3*) sur la durabilité de résistances contournables (gène *Mi-1* pour la tomate, gène *Me3* dans le fond génétique très sensible piment Doux Long des Landes). Le sorgho standard est un Suden grass classique variété 'Lussi'.

En complément, les systèmes S1 et S2 sont également mis en œuvre dans deux parcelles de 320 m² sises à Alénya (site expérimental INRA, 66). Ces parcelles, indemmes de *Meloidogyne*,doivent permettre d'évaluer la faisabilité technique, d'améliorer les itinéraires techniques et d'analyser l'impact des systèmes S1 et S2 sur d'autres pathogènes (autres nématodes, champignons, bactéries).

Système 3 : Une parcelle de 480 m² sise à Marguerittes (30), naturellement infestée par *M. incognita* et *M. arenaria*, est divisée en deux sous-parcelles dites « témoin » et « Traitée ». L'objectif de ce système (Tab. 1) est d'évaluer l'effet de la solarisation et de l'insertion d'une plante de coupure en hiver (mâche) sur la durabilité d'une résistance contournable (gène *Me3* dans le fond génétique très sensible poivron Doux Long des Landes). La culture témoin sensible est la salade.

ANALYSES NÉMATOLOGIQUES / NÉMATODES À GALLES

Les systèmes de culture combinent des cultures en plein (salade, blettes, engrais verts…) et des cultures en rangs (tomate, melon, piment), et exigent un échantillonnage adapté pour suivre l'hétérogénéité des attaques de nématodes. Divers paramètres biologiques, caractérisant la multiplication des nématodes à galles sur les cultures testées et l'état infectieux du sol, sont analysés au cours des 4 années de culture.

Indices de galles sur les cultures (IG) : La détermination des indices de galles est réalisée sur un échantillon représentatif de plantes en fin de culture (30 à 40 plantes par ½ parcelle). L'IG est évalué sur une échelle de 1 à 10 selon le système de notation de Zeck, 1971 (Tab. 2).

Les pontes décelées sur piments résistants (= individus potentiellement virulents contournant la résistance) sont récupérées et analysées: espèces de *Meloidogyne*, virulence sur piment résistant, potentiel reproducteur (viabilité des œufs, fécondité des femelles…)en comparaison avec des populations avirulentes. Ces notations permettront d'étudier les modalités d'utilisation des piments résistants pour éviter l'apparition de contournements.

Taux d'infestation du sol (IS) : Des échantillons de 1 kg de sol sont prélevés après chaque culture dans chaque ½ parcelle en 8 points fixes et déposés chacun dans un pot de tomate sensible (semée 2 mois auparavant à l'INRA de Sophia Antipolis dans un pot à moitié rempli de sol). Deux mois plus tard, les racines sont délicatement nettoyées individuellement sous l'eau du robinet et immergées pendant 10 minutes dans une solution d'éosine à 0,1g/L d'eau, qui colore spécifiquement les masses d'œufs (MO) en rouge (Roberts et al. 1990). Le nombre de MO est compté pour chaque plante et la moyenne est calculée pour chaque ½ parcelle. Ces notations sur 4 ans permettent de suivre l'état sanitaire du sol.

INDICATEURS ECOLOGIQUES / NÉMATOFAUNE TOTALE

Des analyses nématologiques concernant les autres espèces de nématodes phytoparasites et les espèces non phytoparasites utiles (dits nématodes libres), indicateurs de la santé des sols, sont réalisées en parallèle par l'IRD à Montferrier-sur-Lez sur les mêmes points que ceux analysés pour les IS. Ainsi, 16 échantillons de sol sont prélevés après chaque culture pour chaque site expérimental. Les nématodes sont extraits du sol par élutriation (NEM/PS_MO_ELUTRI adaptée de ISO_23611-4) puis identifiés et énumérés (nombre de nématodes/dm3 de sol) sans distinction des stades (juvéniles, adultes) ni des sexes, à l'échelle de la famille ou du genre (NEM/PS_MO_COMPT) pour les nématodes phytoparasites, et sans caractérisation taxonomique pour les nématodes non phytoparasites. Ces notations permettent d'évaluer les effets des systèmes sur la structure des communautés de nématodes phytoparasites et non phytoparasites (évolutions spatio-temporelles des patrons de communautés) et sur la santé des sols (espèces saprophages utiles).

Evaluation agronomique des systèmes de culture

Les dispositifs d'évaluation de S1 et S2 ont été conduits dans deux tunnels de 320m² de la station expérimentale INRA d'Alénya, en sol limono-sableux, avec un taux de 1,7 % de matière organique. Les sorghos standard 'control 1' et 'control 2' ou biofumigant '270911' ont été semés le 14 mai 2013, à une densité de 50 kg/ha pour les sorghos 'témoins et 70 kg/ha pour le sorgho '270911' afin de reproduire les densités réalisées dans les autres sites expérimentaux, puis broyés et enfouis 52 jours après Les piments hybrides résistants *Me1Me3* ont été plantés à une densité de 12 plants/m^2 le 14 mai 2013 et broyés et enfouis 73 jours après. Le stock en N- No3 kg/ha au moment du semis pour les sorghos et de la plantation pour le piment *Me1Me3* était faible (30 et 25 kg/ha respectivement pour les sorghos control 1 et 2; environ 50 kg/ha pour le sorgho '270911' et le piment *Me1Me3*). La biomasse produite en fin de culture a été évaluée sur 4 parcelles élémentaires d'1 m² par traitement .

Dans le système S2, la performance du piment hybride résistant *Me1Me3* utilisé comme plante piège dépend essentiellement de la capacité de son système racinaire à explorer le plus grand volume de sol, et ainsi potentiellement de maximiser le piégeage des nématodes à galles (déplacement de l'ordre de la dizaine de centimètres). La dynamique d'exploration racinaire a été estimée par l'ouverture d'une fosse (largeur 1m50 x profondeur ??) devant 6 plants successifs et dénombrage des impacts de racine sur une grille comportant des carreaux de 2 cm de côté à 4 dates. Ces suivis sur le site d'Alénya, exempt de nématodes à galles fournissent des indications sur l'efficacité théorique du piment piège, mais pas sur son efficacité réelle.

Evaluation de l'acceptabilité des systèmes de culture

Des enquêtes ont été réalisées pour évaluer comment des agriculteurs « recevaient » les innovations techniques et pouvaient « s'en accommoder » (Compagnone et al 2011). L'échantillon comportait 28 maraîchers de Vaucluse et Bouches du Rhône confrontés au problème de nématodes à galles sur leur exploitation et produisant en agriculture biologique ou conventionnelle. L'échantillon couvrait une diversité de surface d'exploitation, de degré de diversification dans les successions de culture et de modes de commercialisation (Chapuis, 2012). Après avoir caractérisé le fonctionnement de l'exploitation, les pratiques utilisées et la sensibilité des agriculteurs face au changement technique, l'enquête visait à leur faire comparer leurs propres calendriers de culture et les systèmes S1, S2 et S3, et à leur faire expliciter s'ils accepteraient de mettre en place ces systèmes et les difficultés que cela poserait (Furnion 2014).

RÉSULTATS

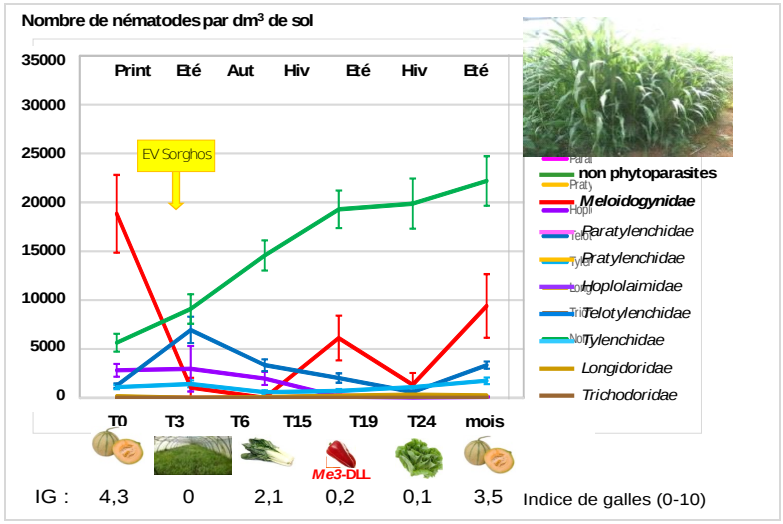
Système S1 « engrais vert d'été : les sorghos, standards ou biofumigants» (Fig. 2)

Protection des piments résistants *Me3*-DLL : Aucune galle n'a été observée sur les racines des 2 engrais verts sorghos 'Piper' et 270911. Les cultures d'hiver (blette et salade) ainsi que la culture d'été de poivrons sur porte-greffe résistant *Me3*-DLL ont été très peu attaquées (IG piment= 0,2).

Gestion des nématodes à galles : Plus de 95% de réduction des populations de *Meloidogyne* ont été obtenus avec les deux engrais verts. Cependant, les cultures d'été, en particulier la culture sensible (melon), ont remultiplié les nématodes à galles, dont les taux dans le sol restent cependant 2 fois moins importants qu'au départ de l'expérimentation.

Impact sur les communautés de nématodes : Les Telotylenchidae se sont multipliés malgré les engrais verts d'été puis la population s'est réduite quelque soit la culture mise en place. Les populations des autres nématodes phytoparasites se sont maintenues à des niveaux faibles. Les populations de nématodes non phytoparasites se sont multipliées tout au long de l'expérimentation, sans aucun effet négatif des engrais verts ou de la culture d'été de poivrons sur porte-greffe résistant *Me3*-DLL.

Figure 2 : Sur le site de Lambesc, effet du système S1 « engrais vert d'été : sorghos standards ou biofumigants » sur l'indice de galles racinaires des différentes cultures et la nématofaune globale du sol (moyennes de 8 répétitions ± erreur standard). *Effect of system S1 "summer green manure: sorghums, traps or biofumigants" on the root gall index of different crops and global soil nematofauna (mean of 8 replicates ± standard error).*



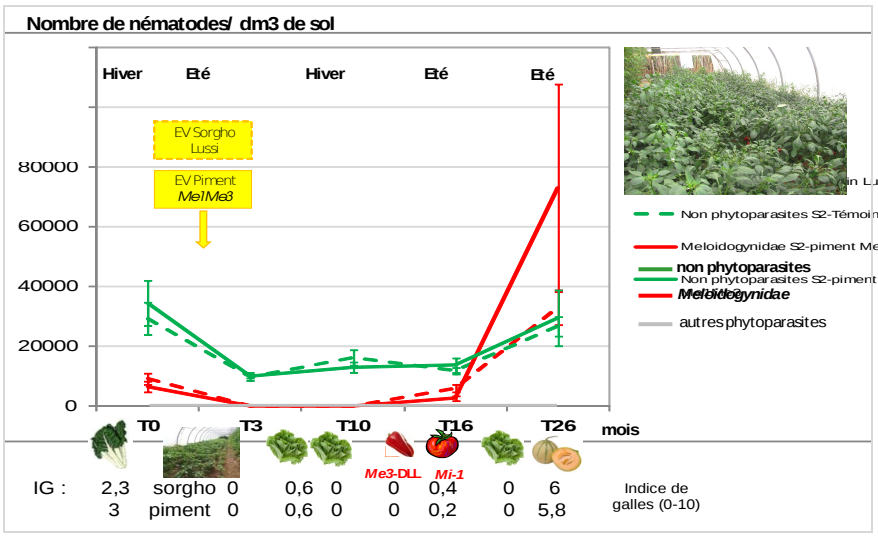
SYSTÈME S2 « ENGRAIS VERT D'ÉTÉ : LES PIMENTS RÉSISTANTS *ME1/ME3*» (Fig. 3 & 4)

Protection des piments et tomates résistants : Aucune galle n'a été observée sur les racines des piments résistants *Me1/Me3* utilisés comme engrais vert, ni sur celles des sorghos standards. Les cultures d'hiver (salade) ont été très peu attaquées. Aucune galle n'a été observée sur les racines des poivrons commerciaux d'été sur porte-greffe résistant *Me3*-DLL. La culture d'été de tomate a également été très peu attaquée (IG = 0,2 après EV piment *Me1/Me3* et 0,4 après EV sorgho).

Gestion des nématodes à galles : Plus de 99% de réduction des populations de *Meloidogyne* ont été obtenus avec les deux engrais verts : sorgho et piment *Me1/Me3*. Les cultures d'été résistantes n'ont pas multiplié les nématodes à galles, par contre, la culture sensible (melon) a remultiplié rapidement les *Meloidogyne* dans le sol.

Impact sur les communautés de nématodes : Les autres espèces phytoparasites étaient rares et à des niveaux très faibles. Le système S2 n'a eu aucune influence sur leurs populations. Les engrais verts ont significativement diminué les populations de nématodes non phytoparasites. Leurs populations n'ont ensuite augmenté qu'au cours de la culture d'été en melon.

Figure 3 : Sur le site de Six-Fours, effet du système S2 « engrais vert d'été : le piment hybride résistant *Me1Me3* » sur l'indice de galles racinaires des différentes cultures et la nématofaune globale du sol (moyennes de 8 répétitions ± erreur standard). *Effect of system S2 "summer green manure: resistant hybrid pepper Me1Me3" on the root gall index of different crops and global soil nematofauna (mean of 8 replicates ± standard error).*

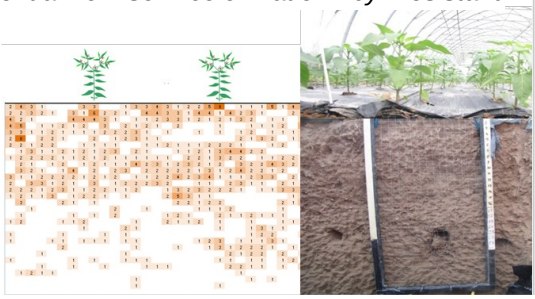


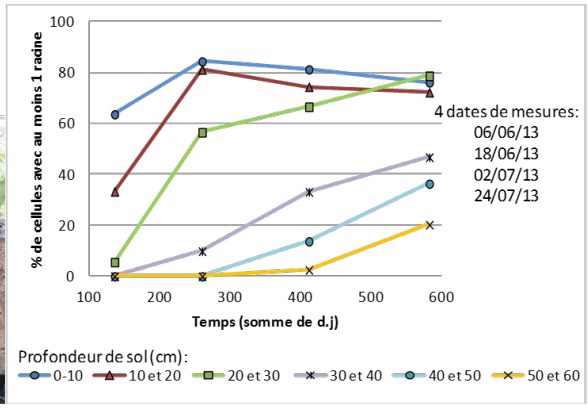
Valeur agronomique des sorghos et piments *Me1/Me3* comme engrais verts (Chapuis 2013) : La quantité de biomasse (MS) produite par le piment *Me1Me3* en fin de culture atteint

4.25t/ha pour une densité de 12 plants/m², ce qui est du même ordre de grandeur que le sorgho dont la MS enfouie varie de 3.2 à 4.8 t/ha.

Potentiel de colonisation du sol par les racines des piments *Me1/Me3* pour piéger les nématodes : Pour une densité de 12 plants/m², l'exploration maximale atteinte est de 80% (c'est-à-dire que 80% des cellules sont occupées par au moins une racine) (Fig. 4). Les 20 premiers centimètres du sol sont vite explorés au bout d'un mois après la plantation, sans évolution ultérieure significative. La zone des 20-30 cm n'est colonisée à 80% qu'au bout de deux mois ; plus en profondeur, l'exploration racinaire est plus limitée. Toutefois un mois après la plantation, la densité moyenne d'impact atteint la valeurs recherchée dans les 30 premiers cm de profondeur. Les observations racinaires sur les cultures de piment commerciales (densité de 2.5 plants/m²) montrent une exploration racinaire beaucoup plus faible, satisfaisante sur le rang mais très insuffisante dans les inter-rangs pour espérer un piégeage suffisant et donc un effet assainissant du sol (données non illustrées).

Figure 4: Sur le site d'Alénya, potentiel de colonisation du sol par les racines des piments résistants hybrids *Me1Me3. Potential of soil colonization by resistant*





Système S3 « solarisation et plante de coupure » (Fig. 5)

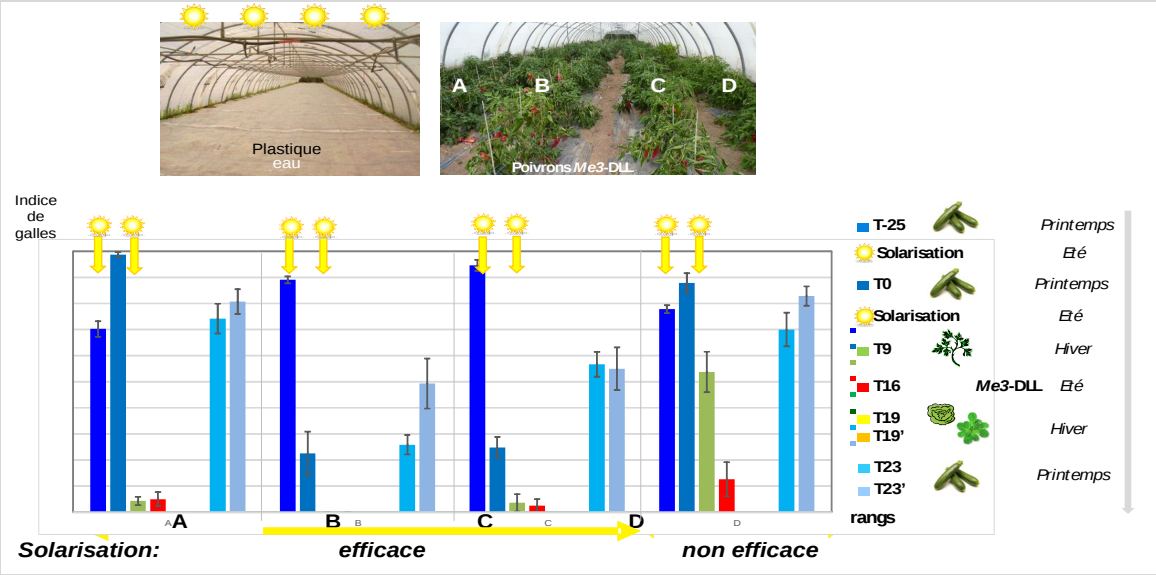
Protection des piments résistants *Me3*-DLL : Sur le site de Marguerittes, la première culture de courgette était très fortement attaquée (IG > 7). La première solarisation a été efficace sur les rangs centraux de la seconde culture de courgette (IG<3) mais pas en bordure (IG > 8). La deuxième solarisation a été efficace à nouveau sur les rangs centraux et sur le rand de bordure A (IG sur persil < 1, IG rang D > 5). La culture d'été de poivrons sur porte-greffe résistant *Me3*-DLL a été très peu attaquée sur les rangs centraux (IG < 0,3) et sur le rang A (IG = 0,5), et moins protégée sur le rang D (IG=1,3).

Gestion des nématodes à galles : Les cultures d'hiver (salade et mâche), plantées très tardivement fin novembre, n'ont pas été attaquées (le cycle des nématodes étant stoppé à température basse). La culture sensible de printemps /été (courgette), a été très attaquées mais les IG sur les rangs centraux (IG < 5) sont restés néanmoins très inférieurs à ceux des rangs de bordure (IG > 7) et à ceux observés au départ de l'expérimentation (IG > 7).

Impact sur les communautés de nématodes : Pas de diversité des communautés de nématodes après solarisation ; Augmentation quantités de Meloidogyne après culture d'été (surtout piment S, courgette) ; Augmentation espèces non phytoparasites (saprophages utiles) avec piments R et S et courgette

Thierry

Figure 5 : Sur le site de Marguerittes, effet du système S3 « solarisation et plante de coupure » sur l'indice de galles racinaires des différentes cultures en fonction des rangs de plantation (moyennes de 30 répétitions ± erreur standard). *Effect of system S3 "solarization and non-host plant" on the root gall index of different crops based on planting rows (mean of 30 replicates ± standard error).*



EVALUATION PAR ENQUÊTE DE L'ACCEPTABILITÉ DES SYSTÈMES DE CULTURE (Fig. 6)

Le degré d'acceptabilité des systèmes de culture dépend de deux ensembles de facteurs, d'une part le type d'exploitation, d'autre part l'attitude des agriculteurs face aux changements techniques (Furnion 2014). Il ressort de ces enquêtes une validation globale des critères qui avaient été pris en compte dans la conception comme le créneau de commercialisation (présence/absence d'une structure de commercialisation pour valoriser les nouveaux produits) et la disponibilité des parcelles (Figure 6a).

-Le prototype S1 utilisant une variété de sorgho nématicide est bien accepté par une majorité d'agriculteurs, ce qui s'explique par le fait que nombre d'entre eux cultivent déjà du sorgho en engrais vert et que le changement propose est mineur, essentiellement le passage à une variété nématicide. Par contre, il n'est pas jugé acceptable sur les exploitations qui ont des cultures d'été longues et dont les parcelles ne sont pas libres en été.

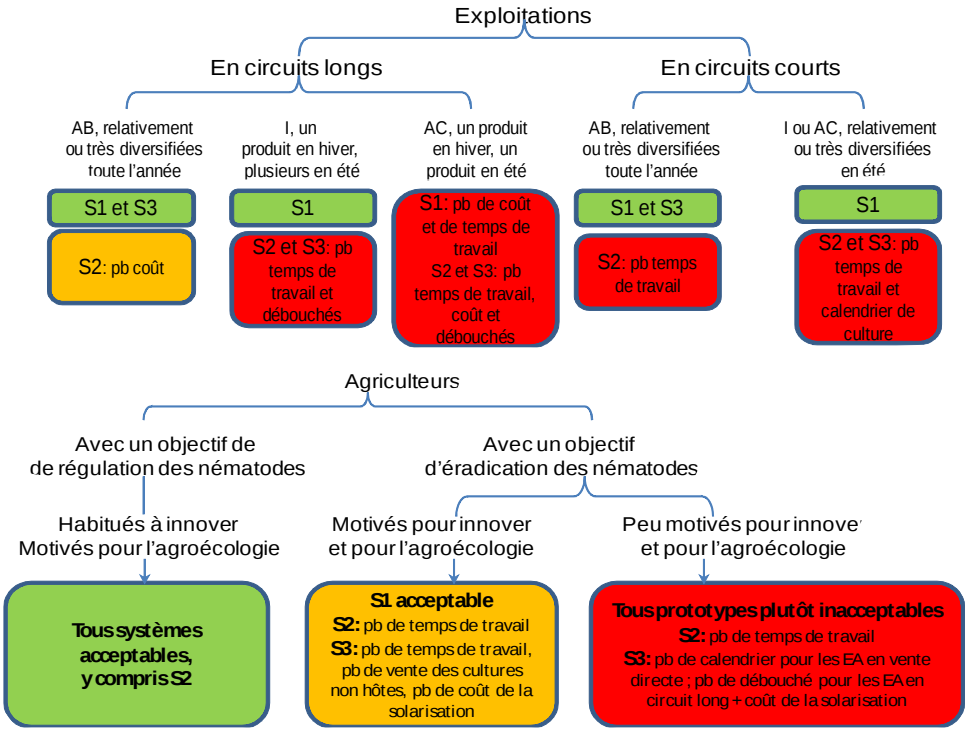
-Le prototype S2 pose probléme à cause du coût des plants de piment (actuellement des hybrides, ce qui augmente le coût des semences) et du temps de plantation par rapport à la référence des agriculteurs qui est le sorgho semé.

-Le prototype S3 est jugé acceptable uniquement pour les exploitations diversifiées.

Cela justifie a posteriori notre choix de ne pas rechercher de solutions valables dans toutes les conditions, mais une gamme d'innovations adaptées à des conditions spécifiques. Le résultat le plus original est que l'acceptabilité des 3 systèmes ne dépend pas seulement des caractéristiques des exploitations, mais aussi des types d'agriculteurs (Figure 7b): plus les agriculteurs sont innovants, plus ils sont intéressés par les pratiques agroécologiques et sont dans une logique de régulation des nématodes plus que d'éradication, plus ils sont prêts à dépasser les limites précédentes de coût et de temps de travail notamment pour le système S2. C'est sans doute la raison pour laquelle dans la figure 7a, la majorité des agriculteurs des exploitations en circuits longs et en agriculture conventionnelle refusent majoritairement les 3 systèmes.

Figure 6 : Evaluation par enquête de l'acceptabilité des systèmes de culture : effet du type d'exploitation (a) et de la sensibilité des agriculteurs face au changement (b) (Furnion 2014).
AB = pratiques certifiées AB ; I = pratiques intermédiaires, incluant des principes relevant de

l'agroécologie ; AC=pratiques en agriculture conventionnelle *Evaluation of the acceptability of cropping systems by survey: effect of type of exploitation and motivation of farmers.*



CONCLUSION-DISCUSSION

La discussion porte successivement sur les dimensions agronomiques et génétiques.

Evaluation agronomique des systèmes de culture : Au bout de deux ans, on constate une baisse des populations de *Meloidogyne* sur la plupart des traitements expérimentaux, après la culture de piment *Me1/Me3* en engrais vert, le sorgho biofumigant et même le sorgho standard. Ce dernier résultat réouvre la question de l'effet du sorgho standard, très controversé dans littérature : parfois considéré comme plante hôte, parfois comme plante non hôte, avec un effet biocide ou non (Viaene et Abawi, 1998 ; Collange et al 2011). Des études complémentaires sont donc nécessaires. On constate également une forte fluctuation des dégâts dans le temps (suivant les cultures) et dans l'espace (entre les rangs de bordure et les rangs centraux par exemple). Par ailleurs, si les populations de nématodes à galles sont réduites après la technique alternative, elles augmentent rapidement dès la culture d'une espèce sensible pendant la période d'activité des nématodes, sans toutefois atteindre le niveau initial. La fin des essais permettra d'observer les effets cumulatifs pluriannuels avant de conclure sur l'efficacité de ces combinaisons de pratiques.
Il faut noter que ces systèmes entrainent une évolution microbiologique dans le sol, comme par exemple l'évolution des populations de nématodes non phytopathogènes mais susceptibles de le devenir (ref thierry ?), information non accessible au producteur. L'analyse des espèces de *Meloidogyne* par PCR (Zijlstra et al, 2000) et estérases (Dalmasso et Bergé, 1978) sur un centaine d'échantillons prélevés sur chaque culture a montré une sélection des espèces par les techniques et rotations culturales: la solarisation, les piments résistants et la mâche sélectionnent *M. incognita* ; les piments sensibles, la salade et le persil ont tendance à multiplier *M. arenaria*. Les données sur les contre-effets possibles des prototypes sur d'autres bioagresseurs, n'ont-elles pas encore été traitées.

Acceptabilité des systèmes de culture : des pistes pour adapter les prototypes : Au-delà des résultats sur le degré d'acceptabilité des 3 systèmes proposés suivant les types d'exploitation et les types d'agriculteurs, le travail d'enquête nous guide sur des pistes d'adaptation possibles des systèmes. Ainsi, pour le piment *Me1/Me3* cultivé en engrais vert,

la densité de 12 plants/m² est jugée satisfaisante dans l'objectif d'un piégeage des nématodes dans l'horizon 0-30 cm, zone principale du développement du système racinaire des cultures maraîchères et donc de forte présence des nématodes à galles. Dans une perspective de réduction des coûts, nous envisageons de tester une réduction de la densité de culture afin de réduire le coût de l'élevage en pépinière et de la plantation, et d'ajuster l'itinéraire technique pour optimiser l'exploration racinaire. Une piste serait aussi de sélectionner des lignées fixées pour réduire le coût de la production des semences et adaptées au semi direct. Il sera donc utile de réinterroger les agriculteurs en fin d'essai-système, une fois connues les performances agronomiques réelles et les possibilités de réduire les coûts.

Perspectives : Toutes les données des expérimentations en conditions contrôlées, semi-controlées et obtenues sur le terrain concernant la durabilité des résistances et la fitness des nématodes virulents et avirulents peuvent également servir de base à des études de modélisation pour simuler, sur des temps plus longs que ne pourrait le faire une expérimentation, la dynamique d'infection des racines par les nématodes en fonction des différentes stratégies de déploiement des gènes de résistance, et ainsi déterminer les stratégies optimales de déploiement des plantes résistantes : pyramidage et alternances saisonnières de différents génotypes. Un modèle paramétré et calibré avec les données expérimentales des projets PICLég 'NEOLEG' (2009-2012), Interreg Alcotra 'VALORT' (2010-2012) et 'SYSBIOTEL' (2010-2013) sur les taux de survie hivernale, les taux de mutation des *Meloidogyne*, les taux de reproduction, les coûts de fitness subis par les populations virulentes (Barbary *et al*., 2014, Djian-Caporalino *et al*., 2014), les taux de croissance racinaire des plantes et le nombre de sites nourriciers potentiels a déjà permis de déterminer la stratégie d'alternance temporelle optimale entre plantes sensibles et plantes résistantes minimisant la perte de rendement, en fonction (i) du niveau de mortalité hivernale des nématodes et (ii) de l'horizon de temps d'optimisation (durée d'exploitation de la culture). Une prochaine étape est d'intégrer les résultats Gedunem sur les taux de mortalité suite aux pratiques agricoles (solarisation, engrais verts nématicides...) et sur les coûts de ces pratiques (variétés R/S) qui détermineront les choix de déploiement par les agriculteurs.).

REMERCIEMENTS

Ces recherches bénéficient du soutien financier du métaprogramme INRA SMaCH-Sustainable Management of Crop Health pour le projet 'Gedunem' (2012-2016) et des labels du pôle de compétitivité agro-alimentaire du Sud-Est 'Terralia' et du Groupement d'Intérêt Scientifique pour la Production Intégrée en Cultures légumières 'GIS PICLeg'.

BIBLIOGRAPHIE

Al Sultan 2003

Barbary A., Palloix A., Fazari A., Marteu N., Castagnone-Sereno P., Djian-Caporalino C., 2014. The plant genetic background affects the efficiency of the pepper major nematode resistance genes *Me1* and *Me3*. *Theorical and Applied Genetics* 127, 499–507.

Castagnone-Sereno P., 2002. Genetic variability in parthenogenetic root-knot nematodes, *Meloidogyne* spp., and their ability to overcome plant resistance genes. *Nematology* 4, 605-608.

Chapuis M. 2012. *Test de la faisabilité de prototypes de systèmes de culture intégrant des techniques alternatives. Enquêtes auprès des producteurs*. Mémoire AgroParisTech, 2ème année, 70p+annexes

Chapuis M., 2013. *Suivi et évaluation de l'efficacité d'une culture de piment résistants aux nématodes utilisée comme engrais verts nématicide*. Mémoire de fin d'étude d'ingénieur, AgroParisTech, 53p + annexes

Collange B. Navarrete M., Peyre G., Mateille T., Tchamitchian M., 2011. Root -knot nematode (*Meloidogyne*) management in vegetable crop production: The challenge of an agronomic system analysis. *Crop Protection* 30 (10), 1251-1262.

Compagnone C., Lamine C., Hellec F. (2011). *Propositions techniques et dynamiques de changement des agriculteurs*. In : *Repenser la protection des cultures* (Ricci, Bui et Lamine Eds), Ed Quae, 101-128

Dalmasso A. et Bergé J.B., 1978. Molecular polymorphism and phylogenetic relationship in some *Meloidogyne* spp.: Application to the taxonomy of *Meloidogyne. Journal of nematology* 10, 323-332.

Djian-Caporalino C., Védie H., Arrufat A., 2009. Nématodes à galles, l'atout des plantes pièges. Dossier « Moyens alternatifs ». *Phytoma La défense des végétaux* 624-625, sept 2009, 21-25.

Djian-Caporalino C., 2010. Nématodes à galles, des ravageurs de plus en plus préoccupants : résultats de 3 ans d'enquêtes dans quinze régions françaises. *Phytoma* 6 *La défense des végétaux* 38, nov. 2010, 43-49.

Djian-Caporalino C., Palloix A., Fazari A., Marteu N., Barbary A., Abad P., Sage-Palloix A.M., Mateille T., Risso S., Lanza R., Taussig C., Castagnone-Sereno P., 2014. Pyramiding, alternating or mixing: comparative performances of deployment strategies of nematode resistance genes to promote plant resistance efficiency and durability. *BMC Plant Biology* 14, 53-66

Esbenshade P.R. and Triantaphyllou A.C., 1985. Use of enzyme phenotypes for identification of *Meloidogyne* species. *Journal of nematology* 17(1), 6-20.

Furnion C., 2014. *Assessing the acceptability of alternative cropping systems limiting the pressure of root-knot nematodes.* ISARA/Wageningen, mémoire de fin d'étude, 66p.

Kratochvil 2004

Navarrete M., Tchamitchian M., Aissa-Madani C., Collange B., Taussig C., 2010. *Elaborating innovative solutions with experts using a multicriteria evaluation tool The case of soilborne disease control in market-gardening cropping systems*. International symposium "Innovation and Sustainable Development in Agriculture and food", Montpellier, June 28 / July 1, 2010 (communication orale et texte 10p) : http://hal.archives-ouvertes.fr/hal-00512273/fr/.

Viaene N.M. et Abawi G.S., 1998. Management of *Meloidogyne hapla* on lettuce in organic soil with sudangrass as a cover crop. *Plant disease* 82, 945-952.

Widmer et Abawi 2002

Zeck W.M., 1971. A rating scheme for field evaluation of root-knot nematode infestations. *Pflanzenschutz-Nachrichten* 24, 141–144.

Zijlstra C., Donkers-Venne T.H.M., Fargette M., 2000. Identification of *Meloidogyne incognita*, *M.javanica* and *M. arenaria* using sequence characterized amplified region (SCAR) based PCR assays. *Nematology* 1, 847-853.