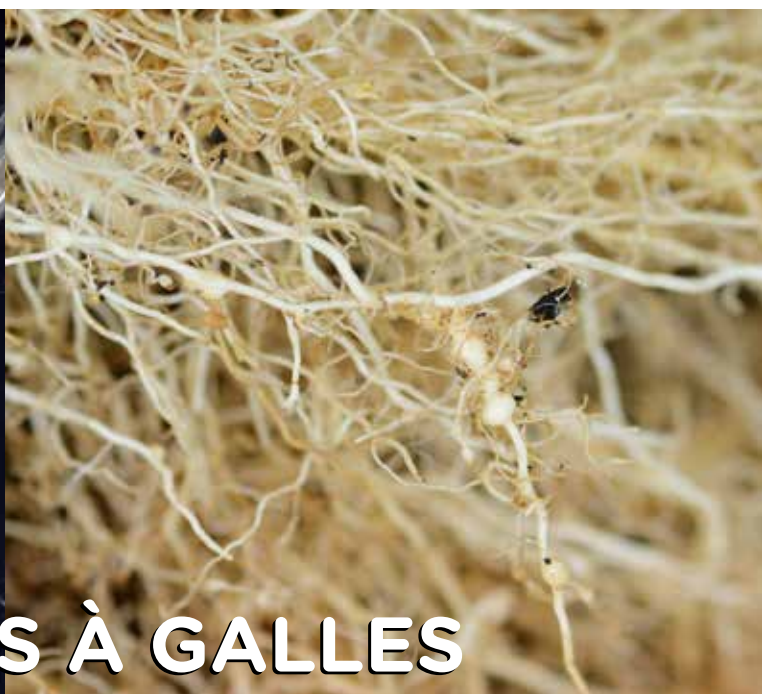


HORS-SÉRIE

InfosCtifl

LE MENSUEL DU CENTRE TECHNIQUE INTERPROFESSIONNEL DES FRUITS ET LÉGUMES



LES NÉMATODES À GALLES

MELOIDOGYNE SPP.





UN PROJET COLLABORATIF



> LES AUBERGINES SONT PARTICULIÈREMENT SENSIBLES AUX MELOIDOGYNE

Infos-Ctifl est édité par le CTIFL
(Centre technique interprofessionnel des fruits et légumes créé par arrêté du 24 septembre 1952 de la loi du 22 juillet 1948)

Adresse
22 rue Bergère, 75009 Paris - Tél. 01 47 70 16 93 -
Fax 01 42 46 21 13

Site internet
www.ctifl.fr

Directeur de la publication
Louis Orenge

Rédacteur en chef
Jean-François Bloch-Berthié -
email : bloch-berthie@ctifl.fr

Comité de rédaction
Pauline Hoeflerlin (CTIFL/INRA), Caroline Djian-Caporalino
(INRA Sophia Antipolis), François Villeneuve (CTIFL),
Marc Delporte (CTIFL)

Mise en page
Frédéric Bourcet

Responsable des abonnements
Véronique Bara - email : abonnement@ctifl.fr

Abonnements
Prix 2018 pour 10 numéros/an
France - 85 € - Étranger 130 €
Prix du numéro 12 €

N° de commission paritaire en cours
Dépôt légal 4^e trimestre 2018 - ISSN 0758-5373

Impression
Chirat - 744 rue de Sainte Colombe
42540 Saint-Just-La-Pendue

Photo de couverture
INRA (Sophia Antipolis) / CTIFL

Toute reproduction partielle ou intégrale est autorisée
sous réserve de mentionner la source

Le GIS PIClég¹ a été créé en 2007 pour concevoir, expérimenter et proposer aux producteurs de légumes des systèmes de production plus respectueux de l'environnement et répondant aux attentes sociétales, tout en restant économiquement performants. Concernant la protection des cultures contre les bioagresseurs, les travaux du GIS PIClég portent sur la mise au point de méthodes alternatives à la protection chimique. Ils contribuent également à la conception de systèmes de culture moins dépendants des intrants chimiques, et visent enfin à analyser les enjeux et conséquences socio-économiques de la production intégrée. Le groupe thématique (GT) sur les bioagresseurs telluriques^{2,2} est l'un des cinq groupes de travail du GIS. C'est dans ce cadre qu'est publié ce hors-série sur les nématodes à galles, réalisé en collaboration avec l'INRA (Sophia Antipolis, Avignon, Alénya Roussillon), le CTIFL, l'IRD de Montpellier, le GRAB, l'APREL, INVENIO, l'APCA et la DGAL. Le sol est un milieu dynamique qui comprend de très nombreux êtres vivants dont les nématodes. Les nématodes telluriques sont de petits vers microscopiques communs du milieu terrestre qui font partie de la microfaune. On peut compter plus de 100 000 individus appartenant à une centaine d'espèces dans un cm³ de sol (Gobat *et al.*, 2003).

On les différencie en fonction de leur mode d'alimentation : ils peuvent être bactériophage, mycophages, saprophages, prédateurs d'autres organismes du sol, zooparasites et phytoparasites (Yeates *et al.*, 1993). 4 500 espèces de nématodes sont phytoparasites (Decraemer & Hunt, 2006) dont les nématodes à galles du genre *Meloidogyne* qui causent les plus importants dégâts dans le monde entier (Jones *et al.*, 2013). Afin de gérer la pression parasitaire et mieux maîtriser leur évolution, le GIS PIClég encourage les projets de reconception et d'évaluation des systèmes de culture pour se protéger contre ces nématodes via des combinaisons de méthodes de protection (physique, biologique, culturale ou variétale) en complément ou en substitution des moyens chimiques. Les recherches actuelles portent sur les combinaisons de leviers techniques agroécologiques performants d'un point de vue du contrôle des populations de *Meloidogyne* et acceptables économiquement par les agriculteurs. L'enjeu est de trouver des stratégies de gestion durables pour contrôler la prolifération des nématodes présents en France et pour empêcher l'entrée de nouvelles espèces présentes dans d'autres pays. Ces derniers sont le plus souvent réglementés afin d'éviter leur implantation sur le territoire ainsi que leur dissémination. ■

¹ Groupement d'intérêt scientifique pour la production intégrée en cultures légumières. Pour plus d'informations sur le GIS PIClég se reporter au hors-série Infos-Ctifl GIS PIClég 2017 ou sur www.picleg.fr.

² Les mots avec un astérisque font l'objet d'un glossaire en fin de document.

créé à l'initiative de





LES BIOAGRESSEURS : MELOIDOGYNE SPP.

Les *Meloidogyne* sont des nématodes endoparasites sédentaires obligatoires : ils effectuent tout leur cycle dans la racine, le seul stade libre dans le sol étant le juvénile* de second stade (J2*). Ils induisent des transformations racinaires importantes conduisant à la formation de galles typiques de l'infection au niveau des tissus conducteurs de la plante qui peut dépérir et mourir, d'où des pertes de rendement et de qualité. Une de leurs caractéristiques est d'être polyphage avec plus de 5 500 espèces de plantes hôtes (Blok *et al.*, 2008). Ils font partie des ravageurs les plus dévastateurs en cultures légumières, allant jusqu'à la perte totale de la récolte (Jones *et al.*, 2013).

Les populations de *Meloidogyne* vivent principalement dans les 5 à 30 premiers centimètres du sol à l'interface racinaire, et sont fortement dépendantes de l'humidité du sol, de sa texture, de la salinité, du pH du sol et de la présence ou non de plantes hôtes.

Sur la centaine d'espèces de *Meloidogyne* décrites à ce jour de par le monde, seules les espèces concernant les cultures légumières en France seront abordées dans ce hors-série.

MORPHOLOGIE, BIOLOGIE ET CYCLE DE DÉVELOPPEMENT

Ver microscopique, *Meloidogyne* spp. est reconnaissable par les dégâts de galles causés sur les racines et les tubercules. Ses caractéristiques principales sont données dans le tableau 1 et la figure 2.

Le cycle de vie se déroule en deux phases (Figure 1) : une phase exophyte* dans le sol, de la ponte à la pénétration des J2 dans la racine, et une phase endophyte* d'élaboration du site nourricier au niveau du cylindre central de la racine (où est véhiculée la sève) permettant l'établissement, le développement et la reproduction du nématode.

Dans l'œuf, le juvénile de stade J1 effectue sa première mue et éclôt au stade J2. De forme allongée et filiforme (Photo 1), le juvénile J2 possède une cuticule fine mais résistante qui le recouvre, le protège et lui permet de se mouvoir plus facilement en présence d'un film d'eau. C'est la seule forme libre qui se dissémine dans le sol. Sa capacité de déplacement est de l'ordre de la dizaine de centimètres (Prot, 1975) et peut être

facilitée par des flux d'eau dans le sol ou par le déplacement de la terre lié au travail du sol. Il pénètre préférentiellement dans la racine au niveau de la zone d'élongation apicale à l'aide de son stylet buccal perforateur et migre entre les cellules en direction de l'apex racinaire, puis entre dans le cylindre central de la racine (McClure & Robertson, 1973 ; Wyss *et al.*, 1992). La cinétique de pénétration est rapide et la majorité des J2 ont

pénétré la racine en deux-trois jours en cas d'inoculation (Von Mende, 1997). Il arrive que le juvénile J2 quitte la racine s'il ne s'agit pas d'un hôte convenable (Reversat, 1986).

Une fois le cylindre central atteint, la larve induit grâce à ses sécrétions salivaires, la formation d'un site nourricier permanent constitué de cinq à sept cellules hypertrophiées, multinucléées et métaboliquement hyperactives (Jones,

TABLEAU 1 : CARACTÉRISTIQUES GÉNÉRALES DES MELOIDOGYNE SPP.

Noms	<i>Meloidogyne</i> spp. ou nématodes à galles (anciennement anguillules)
Taille et description	Ver microscopique du sol mesurant 0,3 mm de long (juvénile de 2 ^e stade libre dans le sol) à 0,7 mm (femelle obèse en forme de poire dans la racine) Stylet buccal perforateur
Mode de reproduction	Sexuée ou asexuée (parthénogenèse)
Cycle de vie	3 semaines à 3 mois (suivant la température) Endoparasite obligatoire (à l'intérieure de la racine) Œufs/juvéniles/adultes : 4 mues successives - évolution
Multiplication	Femelle pond 300 à 1 000 œufs/cycle Plusieurs cycles possibles/an = 300 à 200 000 œufs/an
Conservation	Sous forme d'œufs dans le sol, entre 5 et 30 cm de profondeur
Survie	Juvéniles au moins jusqu'à 15 j. suivant les conditions de milieu (pH, température, humidité sol, présence ou non de plantes...) Œufs > 1 an, sous certaines conditions
Dispersion	Par l'homme (chaussures, outils, machines) et par l'eau au stade J2
Dégâts	Galles sur racines (indice de galles de 0 à 10). Flétrissement, dépérissement, voire mort des plants
Principaux hôtes ⁽¹⁾	Légumes : asperge, aubergine, betterave potagère, carotte, céleris, chicorées, concombre, melon, potiron, courgette, épinard, haricots, laitue, oignon, poivron, tomate, pomme de terre, poireau... ; colza ; céréales ; arbres fruitiers ; cultures florales ; mais aussi adventices dont rumex, amarante, morelle...
Moyens de protection	Prophylaxie : nettoyage, désinfection des outils, non épandage de déchets ou de boues potentiellement contaminés... Protection physique : solarisation, désinfection vapeur, inondation du sol... Protection biologique : matière organique, bactéries, champignons, mycorhizes Protection chimique : pré et post-plantation, traitement semences, extrait de plantes... Protection culturale : rotation, plante-piège, engrais vert « nématicide », jachère noire, biofumigation, biodésinfection anaérobie... Protection variétale : résistance, greffage...

⁽¹⁾ Issu de l'enquête PIClég 2014



1981). Ces « cellules géantes » fournissent les nutriments indispensables au nématode pour achever son cycle de développement sans qu'il n'ait plus à se déplacer (Wyss *et al.*, 1992). L'augmentation de volume des cellules jouxtant les cellules géantes conduit à la formation d'une galle typique de l'infection par *Meloidogyne*. On peut observer des débuts de galles environ dix jours après pénétration dans les racines de tomate. Devenu sédentaire, le J2 perd sa musculature locomotrice et grossit. Entre la deuxième mue (quatre jours après pénétration dans les conditions de température optimales) et la troisième mue (\pm neuf-dix jours), le nématode perd son stylet et ne se nourrit plus (De Guiran & Netscher, 1970). La quatrième mue a lieu vers le 16^e jour, à l'issue de laquelle la différenciation sexuelle se réalise. Il devient une femelle « obèse », petite poire blanchâtre (Photo 2) ou un mâle filiforme (Eisenback, 1985). Lorsque l'état physiologique de la plante hôte est médiocre, cela entraîne une carence nutritionnelle et la fréquence des mâles augmente (Triantaphyllou, 1985), entraînant une diminution de la population infestante à la génération suivante (Davide & Triantaphyllou, 1967). Contrairement aux femelles, les mâles ne se nourrissent pas, quittent les tissus de l'hôte, et ne vivent que quelques semaines (Taylor & Sasser, 1978). Les



> PHOTO 1 : JUVENILE DE MELOIDOGYNE VU À LA LOUPE BINOCULAIRE (STYLET VISIBLE) (SOURCE INRA SOPHIA)



> PHOTO 2 : FEMELLE DE MELOIDOGYNE (PIRIFORME), DANS UNE RACINE (SOURCE INRA SOPHIA)

FIGURE 1 : Cycle d'un nématode à galles

Source : INRA

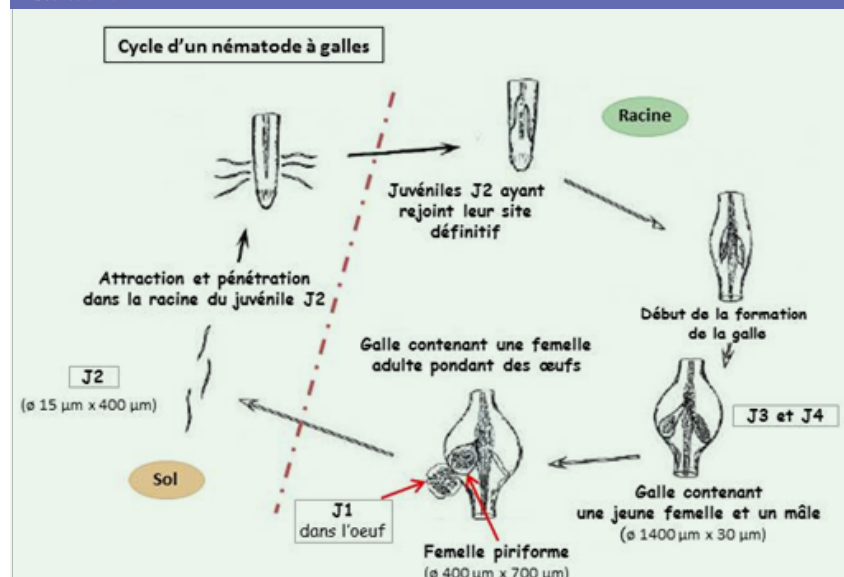
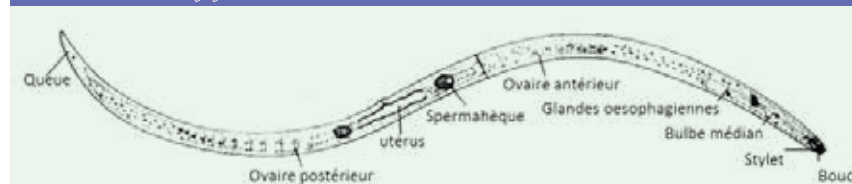


FIGURE 2 : Représentation schématique d'un nématode à galles

Source : De Guiran, 1983



femelles sédentaires continuent à s'alimenter à partir des cellules géantes durant plusieurs semaines et pondent à l'extérieur de la racine de 300 à 1 000 œufs protégés dans une gangue mucilagineuse. Les femelles peuvent produire des œufs pendant deux à trois mois et vivre encore quelque temps après la production d'œufs. Puis elles meurent et les cellules géantes dégèrent (Messiaen *et al.*, 1991 ; De Guiran, 1993). Sous conditions favorables d'humidité et de températures, la plupart des œufs éclosent immédiatement et évoluent en larves. Lorsque les conditions sont peu favorables, ils peuvent passer sous une forme de résistance et survivre jusqu'à cinq ans dans le sol (Taylor & Sasser, 1978 ; Messiaen *et al.*, 1991 ; De Guiran, 1993).

Les températures optimales d'infestation et de développement sont données selon les espèces dans le tableau 2. Pour les deux principales espèces présentes en France (*M. incognita* et *M. arenaria*), elles se situent entre 10 et 35 °C. La durée du cycle se calcule en somme de degré-jours (°C jours)³. Des auteurs ont établi les degré-jours, jours

requis pour l'établissement du cycle des différentes espèces. Le cycle dure ainsi de trois semaines à trois mois selon la température et les espèces de *Meloidogyne* (environ 19 jours à 36 °C, 41 jours à 22 °C, jusqu'à 90 jours à 15 °C). Plusieurs cycles peuvent se succéder en une année, jusqu'à huit générations par an sur tomate (Sikora *et al.*, 2005), mais généralement trois à quatre par an pour *M. incognita* ou *M. arenaria* sous abris plastiques dans le sud de la France. L'infestation peut alors atteindre 100 000 à 200 000 juvéniles J2 par kg de sol (De Guiran, 1983).

MAINTIEN ET DÉPLACEMENTS DES MELOIDOGYNE DANS LES SOLS

Ces caractéristiques sont importantes lorsque l'on souhaite se protéger de ces parasites.

³ Somme de degré-jours = (température minimale + température maximale / 2) – (température de base spécifique à chaque espèce).



La majorité des J₂ est concentrée dans les 5-30 cm du sol et décroît avec la densité racinaire et la profondeur jusqu'à une distance d'un mètre environ (De Guiran, 1983 ; Yeates, 1987), en fonction de la texture du sol, sa température, sa capacité de rétention d'eau et son aération (Sikora *et al.*, 2005).

La pénétration des J₂ dans les racines est optimale lorsque la taille des particules du sol avoisine les 115 µm ce qui correspond à des sables fins (Reversat, 1986). Les J₂ sont alors capables de bouger horizontalement et surtout verticalement (75 cm en neuf jours selon Prot, 1977). La migration décroît lorsque la teneur en argile dans le sol augmente, elle n'est plus possible lorsque le sol contient 30 % d'argile (Prot & Van Gundy, 1981). Les dégâts sur culture sont donc plus importants en sol sableux qu'argileux (Messiaen *et al.*, 1991 ; Koenning *et al.*, 1996). Ils sont également plus faibles dans les sols riches en matières orga-

niques, ce qui serait dû à l'action d'antagonistes (De Guiran, 1993 ; Widmer & Abawi, 2000) et/ou à la libération d'acides organiques toxiques pour les nématodes (Sayre *et al.*, 1964, 1965).

La température du sol est primordiale en dessous de 12 °C et au-dessus de 22 °C, les juvéniles se déplacent difficilement (Vrain *et al.*, 1978). Entre 0 et 5 °C, les juvéniles survivent pendant sept jours mais ne sont plus infectants, et meurent en vingt jours (Vrain *et al.*, 1978 ; Tsai, 2008). À 27 °C, ils peuvent vivre quatre et cinq semaines sans se nourrir (Reversat, 1986). Entre 35 et 40 °C, ils ne peuvent plus infester les plantes (Demeure, 1978). À 45 °C, ils ne survivent pas plus de 4 h (Tsai, 2008) et la survie des œufs baisse également s'ils sont maintenus 3 h à 45 °C (Demeure, 1978). En conséquence, les contaminations sont limitées en hiver sous nos latitudes, d'autant plus que le cycle de développement des nématodes est

ralenti par le froid (Tableau 2). C'est le cas en culture hivernale de salades sous abri. En revanche, pendant cette période, les J₂ se conservent relativement bien dans le sol. Dès le printemps et jusqu'en automne, avec le réchauffement du sol, les contaminations sont très importantes.

Les J₂ préfèrent des pH compris entre 4 et 6 (Davide, 1980), néanmoins ils restent actifs dans toute la gamme de pH et peuvent se maintenir jusqu'à pH 8.

L'humidité du sol a également un impact important sur les nématodes. En conditions sèches, les œufs sont soumis à un stress osmotique et cessent d'éclore, mais le développement à l'intérieur de l'œuf continue. L'éclosion n'a lieu que lorsque J₁ atteint 70 % d'hydratation, mais peut être inhibée par manque d'oxygène dans les sols trop humides. Après éclosion, si le sol devient trop sec, les J₂ meurent (Reversat, 1986) et on n'en détecte plus dans les 20 premiers centimètres après une saison sèche (Demeure, 1978).

LA GESTION DES NÉMATODES : LES PROJETS LABELLISÉS PICLÉG SOUTENUS ET ACCOMPAGNÉS PAR LE GIS

L'objectif de ces projets est d'élaborer des stratégies de gestion des bioagresseurs via l'étude des pratiques agronomiques, des systèmes de cultures et la conception d'innovations techniques et variétales. Les nématodes, parasites majeurs de nombreuses cultures légumières, ont fait l'objet de différents projets à savoir :

- **Néoleg2** (2008-2011), projet PICLég « Vers une nouvelle configuration des agrosystèmes maraîchers méditerranéens sous abris froids pour une gestion durable des bioagresseurs telluriques » visait à reconcevoir les systèmes de culture maraîchers sous abri pour les rendre moins dépendants des pesticides de synthèse. Il combinait des approches par expérimentation, pour mieux comprendre le rôle des rotations et des combinaisons de techniques alternatives, avec une approche systémique basée sur l'évaluation par enquêtes et la co-conception des systèmes de culture. Les expérimentations ont porté sur la gestion des *Meloidogyne* et de *Sclerotinia* (rotations, solarisation, engrais-verts, amendements organiques, déploiement de gènes de résistance).
- **Sysbiotel** (2009-2012), projet ANR « Gestion intégrée des bioagresseurs telluriques en systèmes de culture légumiers » a traité deux volets : le maraîchage sous abris froids dans le sud-est et la rotation plein champ mais-carotte dans le sud-ouest. Il a servi à la création de modèles épidémiologiques simulant la propagation des maladies du sol et leur contrôle grâce à diverses techniques. Concernant les nématodes, Sysbiotel a traité du déploiement de gènes de résistance vis-à-vis de *M. incognita* et *M. arenaria* et a permis la co-conception entre conseillers, expérimentateurs et chercheurs des systèmes de culture qui ont ensuite été évalués dans le projet Gedunem.
- **Prabiotel** (2009-2011), projet Casdar « Maîtrise des bio-agresseurs telluriques, champignons et nématodes, par la gestion des systèmes de culture », a testé l'utilisation de pratiques améliorantes telles que la solarisation et la biofumigation*, en cultures légumières de plein champ et sous-abri froid.
- **Gedunem** (2012-2016), projet Métaprogramme INRA SMaCH « Gestion durable et intégrée des nématodes à galles dans les systèmes maraîchers sous abris » a permis d'identifier et d'expérimenter des systèmes de cultures innovants associant la résistance variétale naturelle à trois autres techniques culturales (sorgho biofumigant en interculture, piment résistant en engrais verts, solarisation et culture d'hiver mauvais-hôte).
- **Gedubat** (2012-2017), projet DEPHY EXPÉ Ecophyto « Innovations techniques et variétales pour une gestion durable des bioagresseurs telluriques dans les systèmes maraîchers sous abris ». Ce projet s'inscrivait dans la continuité de Prabiotel en traitant uniquement les systèmes maraîchers sous abris froids dans le sud-est et le sud-ouest. Les essais ont expérimenté des itinéraires techniques associant combinaisons de pratiques culturales (gestion de la fertilisation et amendement organique, engrais verts, sorgho biofumigant, solarisation, biocontrôle*) et diversification des espèces végétales.
- **Lactumel** (2014-2016), projet Casdar « Recherche de résistance aux nématodes à galles chez la laitue » avait pour objectif d'identifier et d'étudier des accessions du genre *Lactuca*, sauvages ou cultivées, résistantes ou peu sensibles aux *Meloidogyne* présents dans les sols maraîchers français pour fournir aux sélectionneurs des géniteurs de résistances aux nématodes à galles ainsi que des informations sur le déterminisme génétique de ces résistances.



TABLEAU 2 : PRINCIPALES ESPÈCES DE MELOIDOGYNE ET CARACTÉRISTIQUES LIÉES À LEUR CYCLE DE VIE

Catégorie	Espèce	Mode de reproduction	(T°) minimale d'activité	(°C jours) requis pour un cycle	Optimum de développement (°C)	Durée moyenne du cycle/T°	Présence et répartition en France et dans le monde	Hôtes très favorables
ESPÈCES NON RÉGLEMENTÉES	<i>M. arenaria</i>	Parthénogénétique mitotique ⁽¹⁾	8,8	343 à 386	15 < T < 33 Optimum à 24 °C	60 à 90 jours à 16°C, 24 jours à 25°C en continu ; 4 semaines en été, 6 semaines au printemps et à l'automne dans le sud de la France	Les plus communes, surtout dans le sud, et les plus préoccupantes	Solanacées (tomate, aubergine, pomme de terre), Cucurbitacées (melon, concombre), Légumineuses (haricots), carotte, céleris, scorsonère, laitue, endive, artichaut, blette...
	<i>M. incognita</i>		10,1	400				
	<i>M. javanica</i>	Parthénogénétique mitotique	7,5 à 13	350 à 386	20 < T < 35 Optimum à 28 °C	56 jours à 14°C, 21 jours à 26°C en continu	Faible présence à cause de T° trop faible - plutôt Espagne, Afrique du Nord	Solanacées (tomate, aubergine, pomme de terre), Cucurbitacées (melon, concombre), canne à sucre...
	<i>M. hapla</i>	Sexuée. Plus rarement par parthénogenèse méiotique ⁽²⁾	8,2	554	13 < T < 27 Optimum à 20 °C	65 jours à 16°C en continu	Plutôt présente dans le nord sur pomme de terre, betteraves et patates... et ponctuellement dans le sud-est	Pomme de terre, betteraves, carotte, céleris, rosiers, arbres fruitiers, laitues, fraisier...
	<i>M. minor</i>	Parthénogenèse méiotique, plus rarement sexuée ⁽³⁾	5	606-727 (base 5°C)	5 < T < 27	35 à 42 jours à 22,3°C	Plutôt présente dans le nord sur pomme de terre, betteraves et patates... et ponctuellement dans le sud-est	Pomme de terre, tomate, carotte, phaécélie, luzerne, laitue...
	<i>M. naasi</i>	Parthénogénétique méiotique	—	—	10 < T < 30	3 semaines à 28 °C en continu	France et partout en Europe	Graminées (céréales, ray-grass)
	<i>M. graminicola</i>	Parthénogénétique méiotique	—	—	22 < T < 29	19 à 27 jours	Présente en Italie	Graminées (riz), cultures légumières
	<i>M. hispanica</i>	Parthénogénétique mitotique	—	—	15 < T < 35	35 jours à 25°C en continu	Absente en France	Solanacées (tomate, aubergine, poivron, pomme de terre), Cucurbitacées (melon, concombre), Légumineuses (haricots), Brassicacées (chou-fleur, chou pommés...) carotte, céleris, laitue...
	<i>M. artiellia</i>	Parthénogénétique mitotique	—	—	15 < T < 25 Optimum à °C > 600 œufs par masse d'œufs	20 jours à 25 °C en continu	France (île de France, l'Eure, l'Oise, l'Aisne et Champagnes-Ardenne) et partout en Europe	Avoine et grandes cultures (colza et autres brassicacées...)



TABLEAU 2 (SUITE) : PRINCIPALES ESPÈCES DE MELOIDOGYNE ET CARACTÉRISTIQUES LIÉES À LEUR CYCLE DE VIE

Catégorie	Espèce	Mode de reproduction	(T°) minimale d'activité	(°C jours) requis pour un cycle	Optimum de développement (°C)	Durée moyenne du cycle/T°	Présence et répartition en France et dans le monde	Hôtes très favorables
ESPÈCES RÉGLEMENTÉES	<i>M. chitwoodii</i>	Parthénogenèse méiotique, plus rarement sexuée ⁽³⁾	5	600-800 pour la 1 ^{re} génération, 500-600 pour les suivantes	13 < T < 27 Optimum à 20 °C	37 jours entre 20 et 25°C, 47 jours à 20°C en continu	Foyers en Bretagne, Basse Normandie, Île de France, Picardie et Aquitaine	Pomme de terre, betterave, tomate, carotte, astéracées (laitues et scorsonère)
	<i>M. fallax</i>	Parthénogenèse méiotique, plus rarement sexuée ⁽³⁾	–	550 à 740 (base 5 °C)	15 < T < 20	37 jours entre 20 et 25 °C, 47 jours à 20 °C en continu	Foyer en Bretagne	
	<i>M. mali</i>	Reproduction non connue, à priori sexuée (nombreux mâles présents)	–			18-22 semaines sur pommier	Originaire du Japon, détectée aux Pays-Bas et en Italie, un cas en France	Plantes ligneuses, cultures légumières
	<i>M. enterolobii</i> (syn. <i>M. mayaguensis</i>)	Parthénogénétique mitotique	–	–	Optim. d'éclosion 20 < T < 33. 400 à 600 œufs par masse d'œufs	28 à 35 jours en condition favorable	Préoccupation mondiale car aucune résistance connue à ce jour, détectée en Suisse aux portes de la France	Toutes cultures
	<i>M. ethiopica</i> et <i>M. luci</i>	Sexuée	–	–	–	–	Présente en Suisse, Turquie et Slovaquie, considérée comme émergente en France : sans méthode de lutte définie	Maïs, pomme de terre, cultures légumières

En gras les espèces présentes en France (d'après Bird, 1972 ; Bird & Wallace, 1965 ; Charchar & Santo 2008 ; Davila & Dickson 2004 ; Davila et al., 2005 ; Evans & Perry 2009 ; Inerra et al., 1983 ; Korayem & Romascu 1983 ; Lahtinen et al., 1988 ; Maleita et al., 2012a et b ; Milne & Du Plessis, 1964 ; Ploeg & Maris, 1999 ; Rohini et al. 1986 ; Thomason & Lear, 1961 ; Trudgill & Perry, 1994).

⁽¹⁾ pathénogénétique mitotique est une reproduction asexuée stricte avec réorganisation génétique et reproduction rapide

⁽²⁾ pathénogénétique méiotique est une reproduction asexuée facultative qui a lieu en absence de mâle, avec réorganisation génétique à reproduction rapide

⁽³⁾ sexuée : reproduction impliquant une plus grande variabilité

L'optimum d'humidité pour leur pénétration dans la racine et leur développement serait un peu supérieur à la capacité au champ (De Guiran et Demeure, 1978 ; Prot, 1975). Les J2 ne peuvent pénétrer les racines en milieu submergé.

En l'absence de plantes hôtes et donc de nourriture, les J2 mobilisent l'ensemble de leurs réserves énergétiques puis finissent par mourir (Sikora et al., 2005). Néanmoins, les populations de nématodes peuvent se maintenir en infectant les adventices hôtes qui se développent en interculture (amarante, morelle, chénopode...). Dans le cas des jachères

noires bien entretenues, les populations de *Meloidogyne* meurent entre 12 et 24 mois, cette durée étant fortement dépendante de l'espèce considérée (*M. fallax* a une capacité de survie supérieure à *M. chitwoodii*) et des conditions de milieu (absence d'adventice, température, humidité...).

Néanmoins, malgré des conditions du milieu défavorables, les nématodes sont capables de s'adapter et de survivre via des états de quiescence et de résistance. Ces adaptations sont possibles à différents stades de développement. La substance gélatineuse qui enrobe les œufs, joue un rôle important dans la résis-

tance des œufs à la déshydratation en ralentissant la perte d'eau (Wallace, 1968 ; Mahmud, 2014). Le ralentissement du développement embryonnaire (« tardicultus state » ; Evans & Perry, 2009) peut être spontané ou induit, et peut être levé après un certain temps et/ou par un stimulus autre qu'un retour à des conditions favorables (De Guiran, 1979). La dormance est levée lorsque les conditions du milieu redeviennent favorables et les nématodes retrouvent une activité normale (McSorley, 2003). Ces phénomènes ont lieu principalement pendant le stade œuf ou pendant le stade juvénile à l'intérieur de l'œuf. Cette



réduction d'activité et d'émergence des larves augmente leurs chances de survie (Sikora *et al.*, 2005).

PRINCIPALES ESPÈCES MELOIDOGYNE

Sur la centaine espèces de *Meloidogyne* identifiées dans le monde, 23 ont été détectées en Europe (Wesemael *et al.*, 2011) et quelques-unes sont communément présentes en France. Il est possible de scinder les espèces de *Meloidogyne* en deux catégories, suivant leur statut réglementaire (Tableau 2 et

encadré *Meloidogyne* réglementés).

En France métropolitaine cinq espèces sont les plus préjudiciables aux cultures légumières : *M. arenaria*, *M. incognita*, *M. hapla*, *M. chitwoodi* et *M. fallax*. Une sixième espèce peut également être présente *M. javanica*, mais du fait de ses exigences thermiques (Bird, 1972), elle est moins souvent rencontrée.

Dans un sol contenant différentes espèces de nématodes, dont certaines sont bénéfiques et d'autres problématiques pour les cultures légumières, il est très important de bien connaître les espèces et les effectifs présents dans le sol afin d'élaborer des stratégies de protection

adéquates et efficaces. La réalisation d'un diagnostic des espèces *Meloidogyne* par un laboratoire spécialisé est donc primordiale (voir fiche technique 1 « Diagnostic racinaire et analyse de sol »). Ce diagnostic est absolument recommandé, non seulement pour déceler une espèce réglementée, mais aussi pour déterminer le choix d'une technique de protection. Par exemple, l'achat de plants de tomates résistants à *M. incognita* et *M. arenaria* grâce au gène *Mi* peut s'avérer inefficace si la parcelle est infestée de *M. hapla* : il n'y aura ni diminution de population, ni diminution des dégâts car *M. hapla* n'est pas contrôlé par le gène *Mi*. ■

MELOIDOGYNE RÉGLEMENTÉS : LE CONTEXTE

Un arsenal juridique a été mis en place au niveau international, européen et national pour prévenir les introductions de « nouveaux » bioagresseurs, dont des nématodes, mais aussi gérer les foyers.

L'Organisation européenne et méditerranéenne pour la protection des plantes (OEPP) est une organisation intergouvernementale chargée de la coopération internationale en protection des végétaux dans la région européenne et méditerranéenne qui a, parmi ces objectifs, celui de développer une stratégie internationale contre l'introduction et la dissémination des organismes nuisibles qui portent atteinte aux végétaux cultivés et sauvages, dans les écosystèmes naturels et agricoles. À ce titre, cette organisation recense les organismes potentiellement à problèmes, établit d'une part une liste d'alerte et d'autre part deux listes A1 et A2 qui sont des organismes recommandés à la réglementation (A1 absents de la zone OEPP, A2 localement présents). Concernant les *Meloidogyne*, quatre espèces sont sur la liste A2 : *M. chitwoodi*, *M. enterolobii*, *M. fallax* et plus récemment *M. mali*. Quatre autres espèces de *Meloidogyne* ont fait l'objet d'alerte : *M. ethiopica*, *M. luci*, *M. spartelensis* et dernièrement *M. graminicola*.

Au niveau communautaire, deux réglementations principales concernent les mesures de protection contre les organismes nuisibles : la directive 2000/29 actuellement en vigueur et le règlement 2016/2031 qui entrera en application le 14 décembre 2019. Ce règlement définit trois listes :

- les Organismes de quarantaine prioritaires (OQP), qui impliquent des prospections spécifiques, des plans d'urgence préparés à l'avance, des exercices de simulation et des plans d'action en cas de foyer ;
- les Organismes de quarantaine (OQ), impliquant une surveillance, des zones délimitées en cas de foyer et le passage de mesures d'éradication à des mesures d'enrayement ;
- les Organismes réglementés non de quarantaine (ORNQ), leur liste sera adoptée par acte d'exécution.

Au niveau français, le Code rural (CRPM*) au niveau des organismes réglementés distingue trois niveaux de dangers sanitaires (article L201-1) - Tableau 3 - :

- les dangers de première catégorie, dont les manifestations ont des conséquences graves et qui requièrent, dans l'intérêt général, un encadrement réglementaire ;
- les dangers de deuxième catégorie, pour lesquels il peut être opportun, dans un intérêt collectif, de définir des mesures réglementaires ou de reconnaître officiellement l'action menée par certaines filières de production ;
- les dangers de troisième catégorie, pour lesquels les bénéfices escomptés de leur maîtrise relèvent de l'intérêt et de l'initiative privée.

TABLEAU 3 : LES DIFFÉRENTES CATÉGORIES FRANÇAISES D'ORGANISMES RÉGLEMENTÉS

Organismes de catégorie 2	Organismes de catégorie 1	Organismes de catégorie 3
1) faire l'objet d'une réglementation au niveau international ou 2) être inscrit à l'initiative d'organisations professionnelles via une Association sanitaire régionale (ASR) ou 3) être identifié par le CNOPSAV* ou un CROPSAV*	1) répondre aux critères fixés pour la catégorie 2, et 2) présenter un risque sanitaire préoccupant (sur la base de l'avis de l'ANSES), et 3) représenter un risque économique, environnemental ou social particulièrement problématique. Cette analyse est examinée par le CNOPSAV	Organismes non réglementés



MELOIDOGYNE RÉGLEMENTÉS : LE CONTEXTE (SUITE)

L'autorité administrative prend toutes mesures de prévention, de surveillance ou de lutte relatives aux dangers sanitaires de première catégorie. Elle peut prendre de telles mesures pour les dangers de deuxième catégorie (L201-4 du CRPM). Autre conséquence, il existe des possibilités d'indemnisation des pertes économiques occasionnées par les organismes nuisibles aux végétaux de catégorie 1 et 2 par le FMSE* (R361-51 du CRPM) Les organismes de catégorie 3 pour lesquels il existe un Plan collectif volontaire (PCV) deviennent éligibles à l'indemnisation.

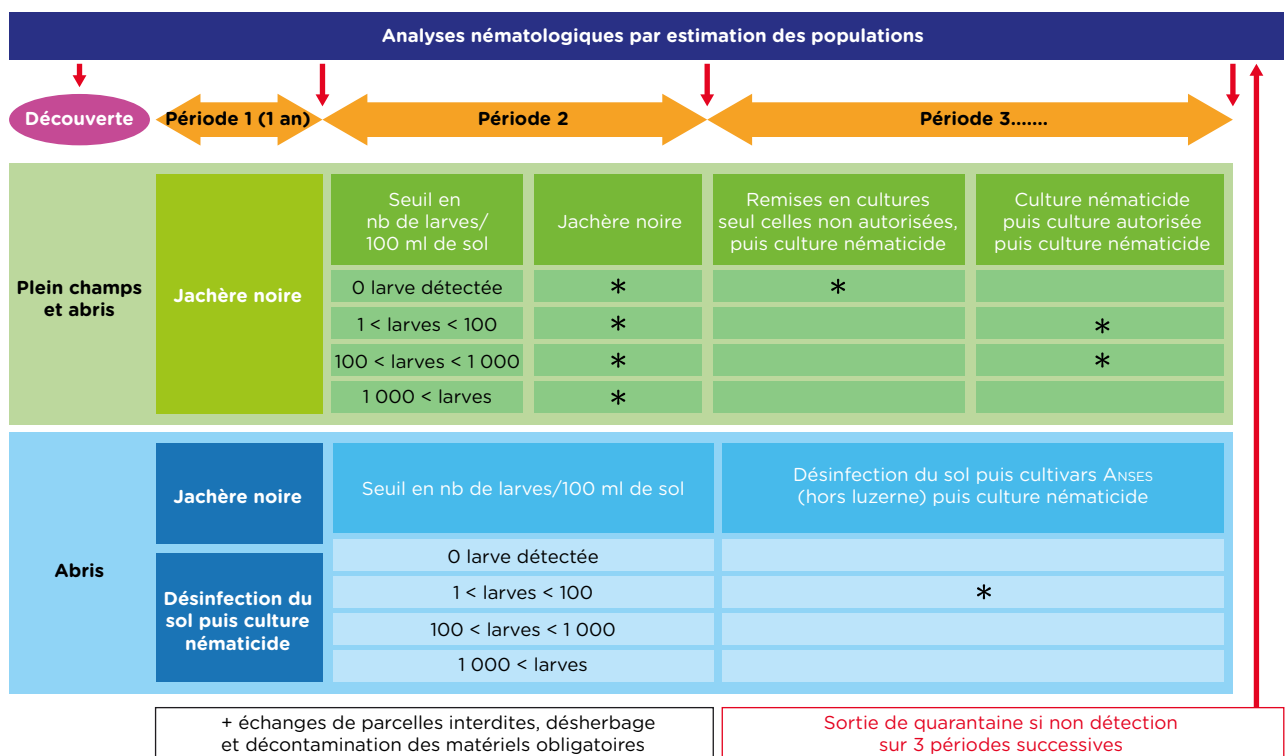
Concernant les *Meloidogyne*, quatre espèces sont classées dans les organismes de catégorie 1 : deux espèces présentes en France et dans l'Union européenne, *M. chitwoodii* et *M. fallax* ; une espèce présente dans l'Union européenne mais absente en France, *M. ethiopica* et une espèce absente en France et dans l'Union européenne, *M. enterolobii* (arrêté du 15 décembre 2014).

Par contre, seul *M. chitwoodii* et *M. fallax* font l'objet d'un arrêté de lutte obligatoire (arrêté du 4 février 2016) qui prévoit :

- à la confirmation de la détection de la contamination définition d'une zone contaminée qui comprend une zone tampon et une zone dite délimitée qui est à minima l'ensemble de l'exploitation agricole ;
- interdiction de mise en culture une année au minimum avec jachère noire et/ou une fumigation de sol sous serre, tunnels et abris ;
- après cette première année, des restrictions de cultures en fonction de la quantité de larves par ml de sol (Figure 3) ;
- limitation des exportations pour certaines destinations ;
- destruction du matériel végétal contaminé, mais avec possibilité de recourir à la transformation industrielle en site sécurisé ;
- prophylaxie : décontamination du matériel agricole, proscription du retour des terres ou tout autre déchet issu des usines, élimination des repousses d'adventices, allongement des rotations, vigilance lors des échanges de parcelles.

Toutes les mesures de gestion sont évolutives et consignées sur une note de service.

FIGURE 3 : RÉCAPITULATIF DES MESURES DE GESTION PRISES DANS LE CADRE DE L'ARRÊTÉ NATIONAL POUR JUGULER LES PARCELLES CONTAMINÉES PAR *M. CHITWOODI* ET *M. FALLAX*

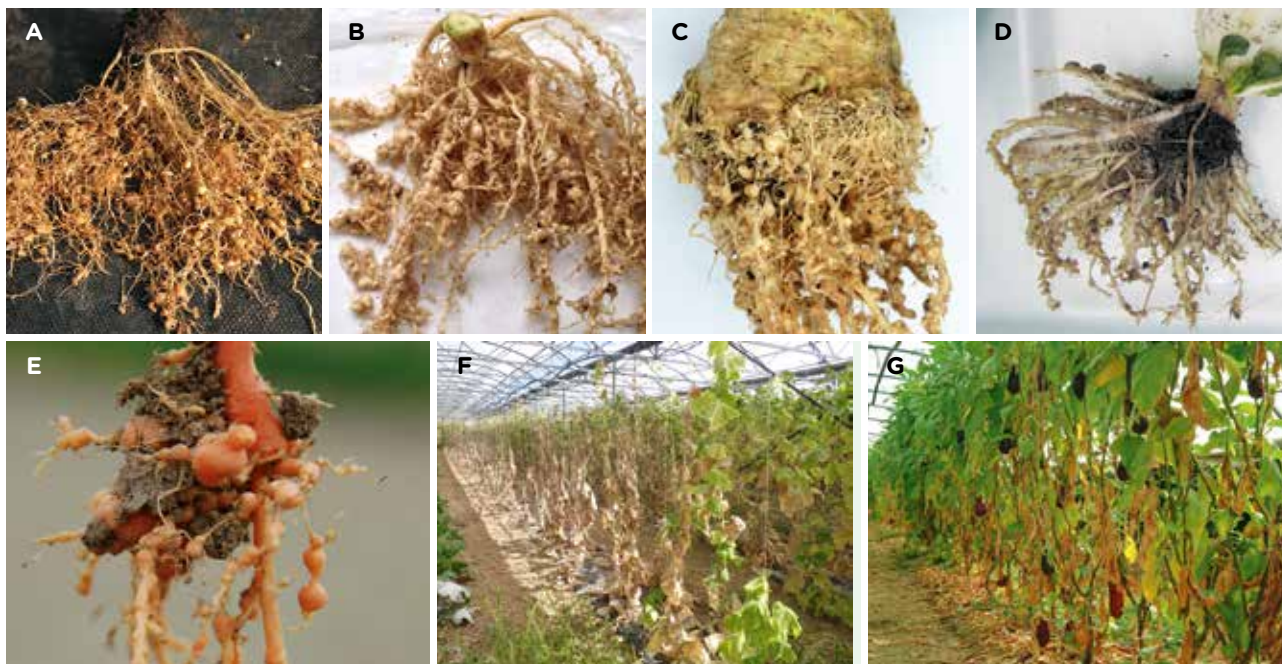


Première méthode dans le cadre d'une lutte obligatoire : la jachère noire

L'efficacité de la jachère noire repose sur la mise en place d'un sol nu (sans cultures, ni fleurs, ni même d'adventices) pendant au moins une année afin de diminuer la population de nématodes à galles en dessous du seuil de détection. Elle nécessite un entretien par désherbage mécanique ou chimique, un nettoyage des outils en sortie de parcelle et un accès limité aux parcelles. L'absence de plantes hôtes empêche les nématodes de proliférer et d'accomplir leur cycle, ainsi l'inoculum* du sol diminue.



LES DÉGÂTS SUR LES CULTURES



> PHOTO 3 : EXEMPLES DE DÉGÂTS ENGENDRÉS PAR LES NÉMATODES À GALLES. SUR RACINES, A : LAITUE (CTIFL), B : MELON (INRA), C : CÉLERI RAVE (CTIFL), D : BLETTE (INRA), E : CAROTTE (CTIFL). DÉRÈGLEMENT DE CULTURES, F : CONCOMBRE (INRA), G : AUBERGINE (CTIFL)

Les dégâts de *Meloidogyne* sont d'autant plus importants que la population est plus élevée au moment de l'implantation de la culture. On observe d'abord un ralentissement de la croissance des plantes puis un flétrissement, et des galles sur racines ou tubercules, ainsi que la déformation des légumes racines (Photo 3). En cas d'infestation forte, les galles peuvent envahir tout le système racinaire, perturbant l'absorption hydrique et minérale de la plante, tandis que le chevelu disparaît. On assiste alors à une forte diminution des parties aériennes, visible souvent par foyers de flétrissement foliaire (taches plus claires dans un champ), et la récolte peut parfois être réduite à néant. Les dégâts sont néanmoins difficilement chiffrables en raison des nombreuses interactions liant les nématodes à galles à d'autres pathogènes fongiques ou bactériens (*Phytophthora*, *Rhizoctonia*, *Pythium*, *Fusarium*, *Pseudomonas*, *Agrobacterium*, etc.) favorisés par les lésions induites par l'entrée des nématodes.

L'estimation du niveau d'infestation nécessite l'observation des racines, bien qu'il soit difficilement quantifiable dans le cas d'une faible population de nématodes (voir fiche technique 1 « Diagnostic racinaire et analyse de sol »).

À cela s'ajoute un seuil de nuisibilité

propre à chaque culture et variable selon les températures, la région, l'année, les conditions de cultures, l'espèce de *Meloidogyne* et même la présence ou non d'autres parasites (Barker & Koenning, 1998). Ce seuil fixe une limite en dessous de laquelle le rendement n'est pas impacté, malgré la présence de légers dégâts foliaires et/ou racinaires. Le seuil de tolérance d'une plante aux nématodes à galles est extrêmement variable selon la plante donnée : pour un même taux de nématodes dans le sol, chaque culture réagit différemment et tolère plus ou moins bien les attaques (peu ou pas de perte de rendement jusqu'à un certain niveau d'infestation) tout en multipliant le parasite.

Les cultures légumières se montrent particulièrement sensibles aux attaques de *Meloidogyne*, les pertes de rendements pouvant être 10 à 100 % selon les cultures (Bertrand, 2001 ; Wesemael *et al.*, 2011). Les exploitations légumières du pourtour méditerranéen (Espagne, France, Italie, Grèce, Moyen-Orient, Afrique du Nord...) sont de plus en plus impactées du fait du retrait quasi-général du marché des nématicides chimiques (Plan Ecophyto 2018, publié en 2009, et Loi « Grenelle 2 » du 12/07/2010), des températures élevées, et de la spécialisation des systèmes légumiers qui ont contribué à augmenter les

problèmes de parasites telluriques. En France, près de la moitié des abris hauts et un tiers des cultures légumières de plein champ sont localisés dans le sud-est en système intensif, d'où des risques importants de développement des nématodes à galles. Une enquête nationale réalisée entre 2007 et 2010 révèle que plus de 40 % de ces exploitations légumières du sud-est de la France sont concernées, aussi bien en conventionnel qu'en biologique (Djian-Caporalino, 2010, 2012). La situation des autres régions est moins claire faute de réponses à l'enquête. Le plus souvent, les systèmes avec des rotations limitées à quelques espèces ou familles sont beaucoup sensibles aux nématodes. Les dégâts sont principalement dus à une remontée des populations suite à l'arrêt de la désinfection des sols, mais aussi au retrait de certaines substances ayant une action secondaire sur les nématodes comme les carbamates ou les organophosphorés (Mugniéry, 2005), et au manque de diversification des espèces cultivées. C'est ainsi que la monoculture d'une espèce végétale déséquilibre l'activité biologique du sol et favorise la multiplication des *Meloidogyne* (De Guiran, 1998). Dans la mesure du possible, il est intéressant de connaître l'historique parcellaire avant l'implantation de nouvelles cultures. ■



LES MOYENS DE PROTECTION

Les produits cités dans ce hors-série ne constituent en aucun cas des préconisations. Pour être utilisés, ces produits doivent avoir une Autorisation de mise en marché (AMM) sur la culture considérée et sur l'usage nématodes. Leur utilisation doit faire l'objet d'une vérification au préalable (sur le site E-phy) avant toute application et il est nécessaire de se conformer aux prescriptions en termes de conditions d'emploi.

Compte tenu de leurs caractères telluriques et endophytes et, de leur résistance aux contraintes abiotiques*, l'éradication totale des nématodes à galles d'un sol contaminé est impossible. Les techniques les plus efficaces permettent d'arriver en dessous du seuil de détection. Ainsi, malgré toutes les techniques utilisées pour maintenir et contrôler *Meloidogyne*, le sol est toujours susceptible de contenir une « communauté résiduelle » qui peut croître rapidement si les conditions lui sont favorables. Une fois que le sol est contaminé, il est donc important de maintenir de façon durable une gestion sur les nématodes pour limiter leur développement, grâce aux techniques de protection indiquées dans cette partie.

Jusqu'à ces dernières années, la méthode de protection la plus utilisée empruntait la voie chimique. Mais depuis les restrictions d'emploi, voire l'interdiction de l'utilisation de certains produits nématocides, des stratégies de protection intégrée sont préconisées combinant prophylaxie, protection physique, biologique, variétale, culturale, et chimique en dernier recours. Aucune n'est suffisamment efficace à elle seule et leur association tout au long de l'itinéraire technique permet d'accroître leur efficacité globale et de toucher différentes phases du cycle biologique. La figure 4 permet de visualiser les méthodes possibles en fonction de ces phases : les principaux moyens d'action contre les nématodes ciblent les stades œuf et J2 dans le sol. Il est ensuite plus difficile d'agir contre les nématodes une fois qu'ils ont pénétré dans la racine. Certaines techniques auront un effet nématocide, d'autre nématostatique ou encore répulsif. Il est donc indispensable de combiner et de diversifier les techniques de protection au sein du système de culture. C'est ce que les différents travaux présentés ici ont cherché à développer (voir encadré sur la co-conception).

IMPORTANTCE DE LA PROPHYLAXIE

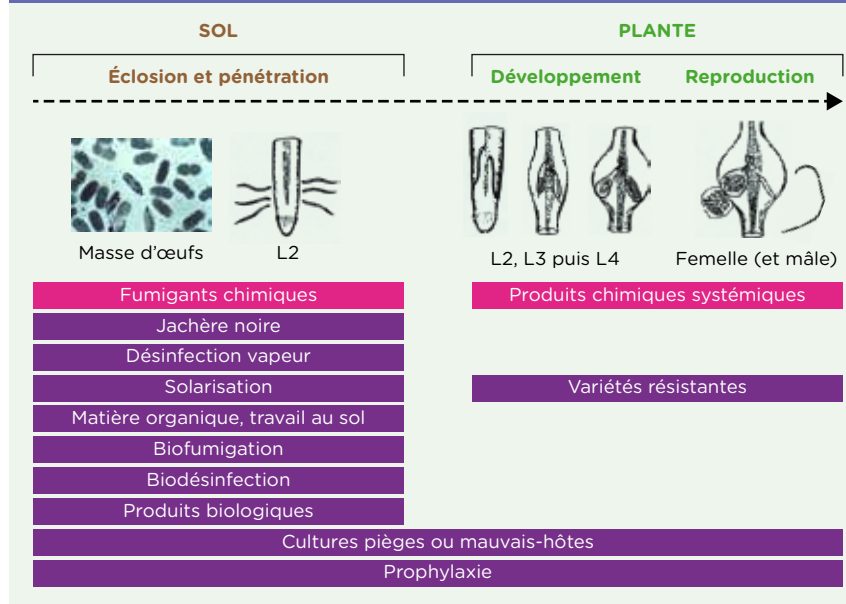
Le premier moyen de protection contre les nématodes à galles est la prophylaxie pour empêcher leur dissémination et leur développement dans les parcelles. Son efficacité est bien démontrée et reste primordiale, en particulier pour éviter la contamination de tout le parcellaire d'une exploitation. Les bonnes pratiques prophylactiques peuvent être l'arrachage des racines, le nettoyage des outils de travail du sol, l'installation d'un pédiluve pour nettoyer les chaussures (voir fiche technique 2 « Prophylaxie »).

LA PROTECTION CHIMIQUE

La protection des cultures vis-à-vis des nématodes par l'utilisation de produits phytopharmaceutiques d'origine chimique utilise deux grandes catégories de produits : des fumigants qui agissent sous forme de gaz dans le sol et des produits pouvant appartenir à différentes familles chimiques comme les carbamates, les organophosphorés ou plus récemment les pyridinyl-éthylbenzamide. La gamme des fumigants autorisés tend à se restreindre fortement et, même dans le cadre d'autorisation, de fortes contraintes sont obligatoires pour éviter les risques environnementaux et les dangers envers les applicateurs. En 2018, deux substances actives dans la catégorie des fumigants disposent d'Autorisation de mise en marché (AMM) en France : le Dazomet et le Métam sodium. Trois autres substances de la même catégorie sont en cours d'évaluation au plan communautaire : le 1,3-Dichloropropène, le Diméthyle disulfure (DMS) et la Chloropicrine. Parmi les autres substances chimiques à actions nématocides ou nématostatiques, le Fosthiazate et l'Oxamyl sont en cours de ré-évaluation (fin de l'approbation respectivement en octobre 2018 et janvier 2019). Parmi les produits étudiés au niveau mondial, seul le Fluopyram a obtenu une AMM en 2016 ; il a la particularité de pouvoir être appliqué en

FIGURE 4 : Méthodes de protection contre les *Meloidogyne* en fonction de leur phase de développement

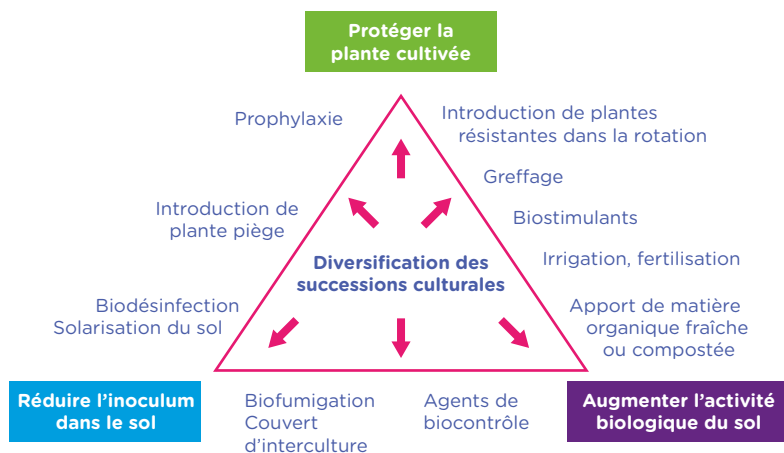
Schéma : Villeneuve (CTIFL), illustration : Djian-Caporalino (Inra)





LA CO-CONCEPTION : VERS DE NOUVEAUX SYSTÈMES DE CULTURE COMBINANT UNE LARGE DIVERSITÉ DE MOYENS DE PROTECTION

Pour accroître l'efficacité et la durabilité du contrôle des nématodes, il est conseillé de combiner plusieurs méthodes de protection et d'agir sur trois dimensions à la fois : protéger la plante cultivée des attaques de nématodes, freiner l'inoculum dans le sol et augmenter l'activité biologique du sol pour favoriser la régulation biologique des nématodes. Le schéma illustre la multiplicité des actions et leviers possibles. Une méthode de protection peut intervenir sur une à trois dimensions à la fois. Par exemple, la solarisation des sols n'agit que sur l'inoculum tellurique ; une plante-piège a un double effet en protégeant directement la plante cultivée et en réduisant



la quantité de nématodes dans le sol ; la diversification des rotations joue sur les trois dimensions : il est possible de réduire l'inoculum du sol grâce à des plantes-pièges, tout en favorisant l'activité biologique du sol par l'enfouissement d'engrais verts, et en protégeant la culture grâce aux variétés résistantes.

Cela peut entraîner des changements importants dans les manières de cultiver et les produits qui en résultent. Il est donc essentiel de concevoir ces nouveaux systèmes de culture avec tous les acteurs potentiellement impactés (agriculteurs, fournisseurs d'intrants, opérateurs commerciaux, conseillers techniques...), en suivant les démarches de co-conception (voir Guide pratique pour la conception de systèmes de culture légumiers économes en produits phytopharmaceutiques, Launais *et al.*, 2014).

cours de culture, contrairement aux deux autres nématicides. Aucun développement n'est encore prévu en Europe pour le Fluensulfone, le Furfural, l'Abamectine ou le Diallyl disulfide (DADS). L'application des nématicides autorisés permet d'implanter les cultures dans de bonnes conditions et d'avoir des rendements corrects, bien qu'ils ne permettent pas de réduire durablement les populations de nématodes. Le plus souvent, les niveaux de populations en fin de culture sont identiques voire supérieurs à ceux observés en début de culture avant intervention. De ce fait dans une démarche de production intégrée durable, il est nécessaire de combiner les approches.

LA PROTECTION PHYSIQUE, EFFICACITÉ VARIABLE

Parmi les méthodes de protection utilisant la chaleur, il existe deux techniques : la solarisation (voir fiche

technique 3 « Solarisation » et encadré sur la solarisation) et la désinfection par vapeur d'eau. Elles peuvent agir sur les œufs de nématodes ou sur les J2 présents dans le sol. Leur efficacité dépend du type de sol (pour la diffusion de la chaleur) et de sa préparation : structure fine, labour profond, arrosage à la capacité au champ sont nécessaires (Katan,

1981 ; Philips, 1990 ; Chellemi *et al.*, 1997 ; Stapleton, 2000). La capacité des nématodes à coloniser les couches profondes du sol, où la température s'élève peu, et à recoloniser les sols désinfectés réduit également l'efficacité de ces techniques. La désinfection par vapeur d'eau est à réserver de préférence pour des surfaces restreintes ; elle nécessite un ma-

LES PROJETS PICLÉG SUR LA SOLARISATION

En tant que pratique améliorante, « Prabiotel » avait expérimenté la solarisation en système sous-abri. Par la suite, la solarisation a été testée par l'INRA dans le cadre du projet « Gedunem » associée à des cultures non-hôtes (type mâche) et a permis une bonne réduction des *Meloidogyne* dans le sol (> 90 %). Dans le projet « Gedubat », l'APREL a testé plusieurs systèmes intégrant une solarisation annuelle ou ponctuelle derrière une culture de melon dans une parcelle contaminée par *M. arenaria* et *M. incognita*. Les essais menés ont permis en grande partie de freiner la progression du pathogène et de diminuer l'inoculum des nématodes à galles en appliquant la solarisation combinée à d'autres moyens de protection (greffage, retrait des racines...). Cependant, les résultats peuvent être variables et très dépendants des conditions de température et de mise en œuvre.

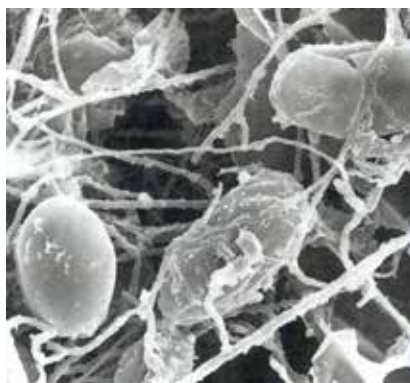


tériel coûteux et consomme beaucoup de fuel. La solarisation est aujourd'hui bien développée dans les régions qui le permettent climatiquement. Certaines limites sont également apparues comme la sélection de bioagresseurs peu sensibles aux températures élevées par exemple *Macrophomina phaseolina*, *Monosporascus cannonballus*, ou encore *Athelia (Sclerotium) rolfsii*.

La submersion des sols peut être utilisée pour asphyxier les nématodes et libérer des substances toxiques dégagées par les résidus de végétaux (acides organiques, sulfure...). Couplée à l'incorporation dans le sol de matières organiques fraîches broyées et bâchage plastique imperméable (voir fiche technique 6 « Bio-désinfection »), l'inondation pratiquée sur la durée fait décroître le nombre de nématodes selon la sensibilité de chaque espèce (Mateille, 1993). C'est une méthode d'asphyxie toujours en cours d'expérimentation aux Pays-Bas (méthode ASD: anaerobic soil disinfestation), parfois essayée en France, mais qui a des conséquences négatives sur la fertilité et la structure du sol.

PROTECTION BIOLOGIQUE AU MOYEN D'AUXILIAIRES NATURELS

Divers antagonistes naturels, champignons nématophages ou parasites, bactéries, mycorhizes, sont connus depuis longtemps, mais très peu disposent d'une AMM en France. De plus, si de bonnes efficacités sont relevées *in vitro*,



> PHOTO 4 : PAECILOMYCES LILACINUS PARASITANT DES ŒUFS DE MELOIDOGYNE (SOURCE : INRA)



> FIGURE 5 : SCHÉMA DU CHAMPIGNON ARTHROBOTRYS IRREGULARIS PIÉGEANT 2 JUVÉNILES DE MELOIDOGYNE (DESSIN DE J.C. CAYROL, INRA).

les résultats sur le terrain sont souvent décevants, notamment du fait de la difficulté de mettre au point des formulations stables permettant une installation et une action efficaces de ces micro-organismes dans des gammes de conditions pédoclimatiques et culturales variées (Stirling & Smith, 1998 ; Alabouvette *et al.*, 2005). Néanmoins, ces techniques de biocontrôle sont en voie de développement pour diminuer la pression parasitaire face aux restrictions d'utilisation des produits phytopharmaceutiques. Des projets récents (« Gedubat », « Euclid »⁴) ont ainsi introduit ces produits de biocontrôle dans des expérimentations, mais étant souvent associés dans des stratégies globales, ils ne permettent pas de conclure sur leur effet d'utilisation individuel. Aucun résultat n'est encore significatif, ni confirmé dans le temps avec ces solutions de protection alternative.

Les champignons prédateurs (genre *Arthrobotrys*) se caractérisent par leur capacité à produire des organes de capture (anneaux constricteurs (Figure 5), boutons adhésifs, réseaux...) qui piègent les nématodes dans le sol suite à un processus de reconnaissance spécifique entre champignon et nématode. Commercialisé en France dans les années 90, aucun produit n'est produit actuellement en Europe, conséquence des coûts de production et d'homologation trop importants jusqu'à ces dernières années.

Les champignons ovicides développent

un mycélium dense qui entoure les œufs de nématodes puis les pénètre pour se nourrir de l'embryon (Photo 4). Deux espèces sont particulièrement étudiées :
– *Purpureocillium (Paecilomyces) lilacinus* dont le taux de parasitisme avoisine les 50 %. Il est particulièrement adapté aux conditions tropicales (températures élevées et pH acides). La souche PL251 est inscrite à l'Annexe 1 du règlement 1107/2008 depuis 2008 (expiration 31 juillet 2019) mais n'a pas d'AMM en France ; il est commercialisé en Angleterre, Portugal, Italie, Maroc, Afrique du Sud, Brésil, États-Unis (26 produits, Bayer, BASF, Certis...). Des essais ont été menés en France avec cette souche.
– *Pochonia chlamydosporia* ou *Verticillium chlamydosporium* a une aptitude parasitaire limitée aux premiers stades de l'embryogenèse du nématode ce qui explique qu'un taux de parasitisme de 43 % n'ait jamais été dépassé. Il n'est pas encore inscrit en Europe mais est commercialisé en Amérique, Inde, Afrique, Chine...

⁴ Projet Euclid (2015-2019) : H2020 - EU-China Lever for IPM Demonstration. Ce projet a mis en place des essais d'intrants et a testé divers produits de biocontrôle utilisant des micro-organismes tels que des champignons nématophages (*Paecilomyces lilacinus* BIOACT) ou des bactéries (*Bacillus firmus* FLOCTER) pour diminuer les attaques de *Meloidogyne* (porté par l'INRA de Sophia Antipolis).



Les endomycorhizes ou Champignons Mycorhiziens à Arbuscules sont des champignons qui possèdent un double réseau mycélien : un réseau externe dans le sol et un interne qui se développe dans la racine où il forme soit des structures d'échange avec la plante soit des organes de réserve. Ce système permet une amélioration nutritionnelle de la plante et masque le pouvoir attractif exercé par les racines vis-à-vis des nématodes. Le projet « Systemic⁵ » étudie l'effet donneur de plantes mycorrhizotrophes (type sorgho, crotalaire, cébette) vis-à-vis des *Solanaceae* (tomate, poivron) pour favoriser la mycorhization de ces plantes et les protéger ainsi des attaques de nématodes. Les projets INRA SMaCH « Reaction⁶ » & « MYMYX » ont pour objectif l'apprentissage et la co-conception d'itinéraires techniques innovants intégrant la mycorhization pour le biocontrôle des bioagresseurs telluriques. Les mycorhizes *Glomus mosseae* (Photo 5) (appelé désormais *Funneliformis mosseae*, *Glomus intraradices* (appelé désormais *Rhizophagus irregularis*) sont commercialisées par diverses firmes françaises avec une AMM comme matière fertilisante support de culture, donc réglementairement pas utilisable en tant que produit de protection des cultures.

Les bactéries *Bacillus firmus* CNCM I-1582 et *Bacillus cereus* CNCM I-1562 agissent en dégradant la paroi des œufs et en perturbant la perception des exsudats racinaires par les larves. Elles sont recommandées en préplantation par irrigation localisée. *B. firmus* 5 %

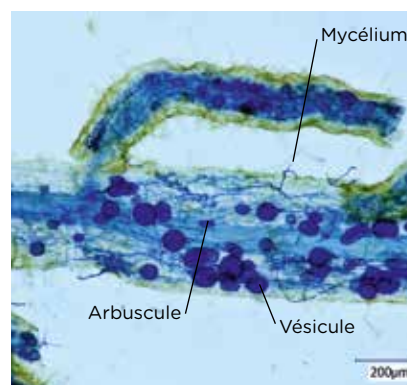
⁵ Projet Ecophyto PSPE2-Biocontrôle (01/2015-01/2018) « Systemic : Culture system design based on the use of mycorrhizae for the biocontrol of tomato soil-borne pests » (porté par l'INRA des Antilles).

⁶ Projet INRA du MétaProgramme INRA SMaCH (Gestion Intégrée de la Santé des Plantes), appel à projet CROPSYS (CROP SYStems) (01/2014-01/2016): « Reaction : Régulations naturelles et leviers d'action : bioprotection préventive de la tomate par les symbioses mycorhiziennes » (porté par l'INRA des Antilles).

souche I-1582 est inscrit à l'Annexe 1 du règlement 1107/2009 et dispose d'AMM en France depuis 2012 sur quelques espèces (carotte, concombre, laitue, melon, poivron et tomate – sur la portée des usages –), distribué sous le nom de FLOCTER en traitement de sol pour la protection contre les nématodes. Les projets « Gedubat » et « Euclid » ont expérimenté cette dernière souche *B. firmus* en testant le FLOCTER. Dans « Gedubat », l'agent biologique a été appliqué sous chapelle, 5,6 kg (soit 80 kg/ha) associé parfois à un agent acidifiant Ph4-ECO, de manière précoce pour favoriser l'action du produit sur les œufs et les juvéniles de *Meloidogyne*, mais les applications n'ont pas permis la réduction des indices de galle et leur installation dans le sol est difficilement mesurable.

Enfin, les bactéries (actinomycètes) à spores adhésives telles que *Pasteuria penetrans* (Photo 6), *P. nishizawae*, *P. thornei*, *Candidatus pasteuria*, se collent sur la cuticule, pénètrent et envahissent leur hôte (nématodes à galles et à kystes) à l'aide d'un tube germinatif filamenteux. Leur trop grande spécificité et les problèmes de production en masse ont fortement limité leur utilisation. Elles sont commercialisées sous le nom d'Econem et Clariva aux États-Unis pour se protéger des nématodes à kyste du soja. Les produits ne sont pas encore homologués en Europe mais on trouve ces bactéries associées aux nématodes à galles dans certains sols français. Néanmoins, la souche Pn1 de *P. nishizawae* vient d'être inscrite à l'annexe I du règlement 1107/2009.

Ces techniques prometteuses peuvent permettre de limiter les infestations de *Meloidogyne* si, et seulement si, elles sont utilisées dans le cas de faibles infestations en nématodes. Elles restent coûteuses et complexes du fait de conditions d'application précises (pH, humidité de sol...) mais aussi de la nécessité d'un stockage à des températures basses pour la conservation de certains de ces produits. Des recherches sont en cours pour trouver des nouvelles souches, déterminer leur mode de conservation, d'application et de survie au champ selon le type de sol.



> PHOTO 5 : RACINE DE TOMATE COLONISÉE PAR *F. MOSSEAE* (SOURCE : M. RODRIGUEZ-HEREDIA, INRA)



> PHOTO 6 : JUVÉNILÉ DE MELOIDOGYNE JAVANICA PARASITÉ PAR *PASTEURIA PENETRANS* (SOURCE : T. MATEILLE, IRD).

UTILISATION DES PLANTES AFIN DE CONTRÔLER LES NÉMATODES

L'espèce, voire la variété, de plante présente sur un sol va intervenir de plusieurs façons sur les communautés de nématodes phytoparasites, d'abord de par sa sensibilité propre à certaines espèces de nématodes, mais aussi via ses exsudats racinaires qui vont impacter les communautés de micro-organismes. Certaines plantes ont également des propriétés nématicides intrinsèques ou en réaction à l'infestation, d'autres vont libérer des substances biocides lors de leur décomposition dans le sol.

Le tableau 4 indique de manière succincte ces différents modes d'action. Une espèce donnée, voire une variété, ne peut parfois avoir d'effet que sur une espèce, voir une population de nématodes. Ainsi, toute technique avec son mode d'action spécifique doit être mise en œuvre en fonction d'un mode d'emploi très précis, sinon l'effet escompté pourrait être opposé.



TABLEAU 4 : DESCRIPTION DES DIFFÉRENTES TERMINOLOGIES DE PLANTES DE COUPURE D'APRÈS VILLENEUVE & DJIAN-CAPORALINO, 2013 (VOIR FICHE TECHNIQUE 7 « PLANTES DE COUPURE »)

Type de plante	Action et description	Exemple d'utilisation	Action sur la population de nématodes
Action sur la population de nématodes	Peu ou pas d'attaque par l'espèce de nématode à galles considérée (résistance spécifique à une ou plusieurs espèces, voire d'une population d'une espèce donnée). Le nématode est emprisonné à l'intérieur des racines et ne peut finir son cycle : pas de production d'œufs.	Très peu de plantes cultivables sont résistantes : tomate et porte-greffe tomate et aubergine (mais des contournements de résistance apparaissent), pomme de terre, porte-greffe poivrons...	Diminue la population
Plantes pièges résistantes	Stimulent l'éclosion des juvéniles infectantes, les attirent dans les racines et bloquent leur développement.	Les piments résistants Me1/Me3 suivant les conditions d'applications (Navarrete <i>et al.</i> , 2016) peuvent être utilisés en porte-greffe poivrons ou en engrais vert dans l'interculture.	
Plantes « pièges » sensibles	Plantation ou semis de la plante sensible mais qui est détruite avant la fin du cycle du parasite pour empêcher son développement.	Persil, carotte, salade plantés tôt à l'automne, sorghos en engrais vert*. Ces plantes-pièges doivent être détruites absolument avant 3-4 semaines (selon les T °C) sinon l'effet sera opposé.	
Plantes non hôtes ou immunes	Mort des nématodes car la plante ne permet pas leur développement : exsudat racinaire toxique, toxines nématocides constitutives ou produites en réaction à l'infestation. Elles ne permettent aucune reproduction de nématodes et ne présentent aucun symptôme de galles.	Astéracées (chrysanthème, cosmos, gailarde, tagètes), Euphorbiacées (ricin), Fabacées (crotalaires, soja, pois de Tahiti), Meliacées (neem, lilas de Chine), Pedaliacées (sésame), Poacées (avoine, citronnelle, gros chiendent), Solanacées (datura, morelle de Balbis)	
Plantes éradiquantes/nématocides à composé biocide	Libération de substances toxiques ovicides ou larvicides dans le sol lors de la dégradation de la matière fraîche.	Les sorghos en biofumigation (sorgho 270911 enfouit à 3-4 semaines), les tagètes (œillet d'Inde <i>Tagetes patula</i> , <i>T. erecta</i> , <i>T. minuta</i>), certaines variétés de radis, de moutardes et de roquette.	
Plantes mauvaises hôtes	Plantes à résistance totale ou partielle qui n'augmenteront pas, ou très peu, la population de <i>Meloidogyne</i> . Elles ne sont pas, ou très peu, affectées par les dégâts de galles.	Sorghos, millet, moutarde, crotalaire. La mâche suivant les conditions d'application si plantée tard à l'automne ou en hiver.	Maintien la population
Plantes hôtes tolérantes	Plantes sensibles qui ne souffrent pas du parasitisme mais qui permettent la multiplication du nématode.	Certaines variétés de pomme de terre, tomate, melon, courgette sont tolérantes. Elles permettent une forte reproduction des nématodes (galles très importantes) mais sans perte apparente de rendement. Diagnostic trop tardif entraînant une augmentation forte de la population de nématodes.	Augmente la population

LA RÉSISTANCE VARIÉTALE

La protection variétale englobe les plantes ou porte-greffe résistants qui bloquent les nématodes au niveau des racines par une réaction d'hypersensibilité* et les empêchent d'établir un site nourricier (voir fiche technique 4 « L'utilisation raisonnée des résistances et rotations »). Par exemple, les nématodes attirés par les exsudats racinaires d'un plant de tomate résistant se retrouvent piégés dans la racine et ne peuvent accomplir leur cycle complet

jusqu'à la reproduction. Cette méthode combine plusieurs avantages par rapport aux autres plantes « pièges » : les cultures sont saines (sans galle) et productives et permettent une réduction efficace du taux d'infestation du sol.

Néanmoins, cette protection variétale se heurte dans la pratique à plusieurs limites :

- un nombre d'espèces légumières résistantes encore très limité ;
- des spectres d'action restreints à

quelques espèces de *Meloidogyne* ;

- des augmentations d'espèces de *Meloidogyne* ou d'autres nématodes phytoparasites non réprimés par les résistances (souvent très spécifiques) ;

- l'apparition et l'extension de populations de *Meloidogyne* virulentes qui se multiplient sur plantes résistantes, ce qui réduit significativement la durée d'exploitation des variétés résistantes commercialisées ;

- une perte d'efficacité de la résistance à haute température.



Suite à la pression croissante des nématodes sur les cultures, les sélectionneurs de semences, en collaboration avec l'INRA et les Instituts techniques, prennent en compte la résistance à ces parasites dans leurs programmes d'amélioration variétale. Ainsi, de même que la résistance des piments étudiée dans le cadre des projets CTPS « Résistance nématodes⁸ », « RA4.2 - Exploitation of Plant Genetic Resistance⁹ », « Sysbiotel », « Néoleg2 » et « Gedunem », d'autres travaux de recherche sur laitue (projet « Lactumel ») ont porté sur la recherche de géniteurs sauvages potentiellement résistants aux nématodes à galle. En effet, certaines accessions permettent le blocage du cycle des nématodes en inhibant le nombre de pontes (même si le nombre de galles sur racines reste important) mais avec une spécificité d'action (soit *M. incognita*, soit *M. arenaria*). Ces géniteurs résistants au laboratoire devront encore être validés en sols agricoles puis utilisés par les sélectionneurs pour l'introggression des gènes de résistance de ces variétés sauvages dans les variétés cultivées.

Une idée innovante testée dans le cadre du projet « Gedunem » a également porté sur l'utilisation de plantes résistantes en engrais verts (par exemple, un piment très résistant pyramidanant deux gènes complémentaires, Navarrete *et al.*, 2016). Utilisés en interculture, ces plantes permettent de diminuer le taux d'infestation du sol en piégeant les nématodes sans risque de multiplication si elles sont cultivées plus de 3-4 semaines et sans risque de contournement des résistances. De la même manière, certaines variétés appartenant à la famille de Brassicacées (certaines variétés de radis et de roquette résistantes à *M. chitwoodii* et à *M. fallax*) ou encore certaines variétés de sorgho pas ou peu multiplicatrices de *M. incognita*, peuvent être utilisées dans les rotations pour diminuer les taux d'infestation du sol.

Les projets « Sysbiotel », « Néoleg2 », et « Valort¹⁰ » qui ont porté sur l'étude de la gestion des résistances du piment au champ, ont également montré l'importance cruciale d'alterner les résistances,



> LA SOLARISATION PERMET DE GÉRER LES BIOAGRESSEURS TELLURIQUES DONT LES MELOIDOGYNE

ou bien d'éviter les successions de la même résistance chaque année. Dans le cadre du projet régional « GoNem¹¹ » l'alternance de gènes de résistance sera à nouveau testée en utilisant cette fois des porte-greffe tomate (*Mi-1*) et aubergine (*Solanum torvum*).

Les résistances variétales doivent certainement être employées de manière raisonnée pour éviter les contournements de résistance et suivant la spécificité d'action des gènes à une espèce de *Meloidogyne*, et elles doivent s'intégrer dans une démarche globale visant aussi le contrôle des autres bioagresseurs et la diversité des moyens de protection déployés. En effet être résistant aux nématodes à galle, ne veut pas dire résistants aux autres bioagresseurs.

PROTECTION VIA LES SUBSTANCES NATURELLES D'ORIGINE VÉGÉTALE ET LA MATIÈRE ORGANIQUE

Plus de 200 espèces de plantes ont été étudiées pour leurs propriétés nématicides (synthétisé dans Djian-Caporalino *et al.*, 2008). Les substances actives peuvent être exsudées au niveau racinaire et agir soit en inhibant la pénétration des juvéniles dans les racines (effet répulsif du sésame), soit en inhibant l'éclosion des œufs (effet ovicide de la graminée *Eragrostis curvula*), soit en empoisonnant les nématodes (effet larvicide de la pervenche de Madagascar,

Catharanthus roseus). Les essais menés par le GRAB entre 1998 et 2000 ont montré par exemple que l'apport printanier sur plusieurs années de tourteaux végétaux de neem et de ricin pouvait avoir une action cumulative intéressante

⁸ Contrat national du ministère de l'Agriculture, de l'Alimentation et de la Pêche / CTPS*, Convention n° Co6-03 (01/2007-01/2010): « Résistance nématodes : test de la durabilité des résistances conférées par des gènes majeurs vis-à-vis des nématodes à galle du genre *Meloidogyne* chez les Solanées maraichères (piment, tomate) » avec trois sociétés privées françaises (Syngenta Seeds, Vilmorin et Clause-Tézier).

⁹ Contrat du réseau européen d'excellence FP6-NoE d'acronyme ENDURE (01/2008-06/2009): « RA4.2 - Exploitation of Plant Genetic Resistance » « European Network for the Durable Exploitation of crop protection strategies ».

¹⁰ Projet transfrontalier Interreg Alcotra (01/2010-03/2012): « VALORT : Valorizzare l'orticoltura transfrontaliera » mené dans le cadre d'un programme de coopération territoriale européenne franco-italien.

¹¹ Projet des groupes opérationnels des PEI (Pôle européen d'innovation), Type d'opération 16.1 du programme FEADER en PACA (2018-2021) : « GONem Groupe opérationnel sur la gestion des nématodes à galle en maraichage en PACA ».



(Védie & Lambion 2007). Les résultats étaient cependant aléatoires selon les années et les sites, et peu satisfaisants lors de fortes infestations.

De très nombreux extraits de plantes ont également été testés vis-à-vis des nématodes à galles avec souvent une bonne activité nématostatique ou nématicide *in vitro*. Cependant, au champ, aucun effet n'était relevé avec les extraits testés en culture de tomate infestée (Védie *et al.*, 2006). La vitesse de dégradation des produits dans le sol et l'intensité d'infestation des sites peuvent expliquer ces mauvais résultats au champ. Dans le cadre du projet « SERUM¹² », des *Allium* (ex : oignon, cives...) et des crotalaires (*Crotalaria juncea*) sont actuellement testés pour leur capacité à protéger la tomate contre les *Meloidogyne* et la bactérie *Ralstonia solanacearum* via leurs effets allélopathiques*. Leurs extraits et produits dérivés (diméthyl disulfure ou DMDS, produit de dégradation de l'aillicine) sont testés pour désinfecter les sols.

Les crotalaires ont un effet nématostatique sur les nématodes à galles (Robinson *et al.*, 1998 ; Jourand *et al.*, 2004a & b ; L'Etang, 2012). Elles produisent aussi des métabolites secondaires (monocrotaline, sénécionine, héliotrine, lasiocarpine) qui induisent des effets nématicides, ovicides et répulsifs (Thoden *et al.*, 2009). Ces espèces légumineuses tropicales peuvent être utilisées comme engrais verts. Leur utilisation en France métropolitaine sous serre se heurte toutefois à des contraintes techniques liées aux cycles de développement, à la nécessité de températures et de périodes jour-nuit adaptées¹³ ne permettant pas une mise en place avant mi-avril. Il faut donc choisir leurs modes de culture (co-

culture, interculture) et d'application (utilisation *ex-situ* après différents modes de broyage et de stockage éventuels) en fonction des productions légumières et des contraintes de l'exploitation.

Certains composés directement contenus dans les plantes ou issus de la décomposition présentent des propriétés biocides qui vont pouvoir intervenir sur les niveaux de populations de *Meloidogyne*. À ce titre, il est possible de citer les glucosinolates contenu dans les Brassicacées qui en contact avec l'enzyme appelée myrosinase vont être hydrolysés en isothiocyanates bien connus pour leurs propriétés biocides. Il y a aussi certaines plantes qui sont riches en glucosides cyanogènes dont la dhurrine qui se transforme en acide cyanhydrique. C'est en particulier le cas de certaines variétés de sorgho. Enfin, les *Allium* sont connus pour leur effet nématicide dus à des composés soufrés : diméthyle-dipropyle (DPDS) et diméthyle-disulfure (DMDS) (Tada *et al.*, 1988).

Ces plantes peuvent, après culture, être simplement enfouies pour bénéficier de leurs effets biocides sur les nématodes, on parle alors de biofumigation (voir **fiche technique 5 « Biofumigation »**). On peut également les enfouir, ramener le sol à la capacité au champ, bâcher avec un plastique imperméable aux gaz pour limiter l'apport d'oxygène à la couche

arable, et à laisser six semaines en été pour assainir le sol. Cette méthode appelée ASD (anaerobic soil disinfection = désinfection anaérobie du sol, voir **fiche technique 6 « Biodésinfection »**) combine plusieurs modes d'actions :

- augmentation de la compétition entre micro-organismes, en particulier pour les oligo-éléments (fer en particulier), l'oxygène... ;
- modification de l'atmosphère du sol, provoquant des modifications des équilibres biologiques dans le sol ;
- libération de molécules présentant des propriétés fongicides, fongistatiques, insecticides, nématicides, nématostatiques et même phytotoxiques ;
- modification du cycle de l'azote, avec augmentation de l'azote ammoniacal ;
- enfin en fonction de la période, augmentation de la température liée au bâchage, ce qui induit des changements des équilibres apparentés à la solarisation.

Des essais au champ ont montré une très bonne efficacité du DMDS pour gérer les *Meloidogyne* (Védie & Aissa-Madani, 2009). Une formulation du DMDS est en cours d'évaluation au niveau européen en vue de son inscription à l'annexe 1 du règlement 1107/2009 en vue d'une utilisation comme fumigant. Par ailleurs, des extraits d'ail ont permis de réduire l'infestation des tomates



> BROYAGE AVANT ENFOUISSEMENT D'UN RADIS AFIN DE PROFITER DES EFFETS BIOCIDES DES SUBSTANCES POUVANT ÊTRE LIBÉRÉES

¹² Projet EcoPhyto PSPE2 Essor Biocontrôle (2014-2017) : « SERUM : Désinfection des sols en cultures maraichères » porté par le CETU (Centre d'expertise et de transfert universitaire) Innophyt, université François Rabelais de Tours.

¹³ Le rythme nyctéméral est caractérisé par la variation de la luminosité sur 24 h et par la variation de température entre le jour et la nuit.



en chambre climatique (Gong *et al.*, 2013). Le seul verrou technique actuel pour produire les effets de désinfection des sols via les *Allium* est le choix des espèces et leur mode d'application au sol : rotation, mulch, enfouissement, association en lien avec les itinéraires techniques de la tomate. Un extrait d'ail, le NEMGUARD granules (Certis Europe) dispose d'une AMM depuis 2016 pour l'usage nématicide en plein champ et sous abris pour quelques cultures légumières : carotte, laitue, melon, poivron et tomate (sur l'ensemble de la portée de l'usage c'est-à-dire aux cultures rattachées à la culture principale, se reporter au catalogue des usages). Cette spécialité a été essayée dans le cadre du projet « Gedubat » par l'APREL, mais les références au champ manquent et doivent être encore acquises sur le terrain afin de démontrer la réduction de l'indice de galles* sur les cultures. Dans les essais, les granulés de NEMGUARD ont été épandus à la main sous le paillage mais n'ont pas pu être incorporés dans le sol ; une dose de 20 kg/ha a été appliquée de façon localisée sur la ligne. La granulométrie du sol est importante à prendre en considération avant l'application du NEMGUARD à cause de sa moindre efficacité en sol argileux.

Dans le cadre du projet « Gedunem », l'intérêt des sorghos dans le contrôle des

populations de *Meloidogyne* a été étudié. L'effet variétal du sorgho est un exemple montrant les effets positifs ou négatifs d'une plante sur les nématodes à galles selon son niveau de résistance, de sa qualité d'hôte et, de son mode d'utilisation : un sorgho sensible multiplie les nématodes sauf s'il est enfoui à 3-4 semaines (avant la fin du cycle du nématode), un sorgho totalement non-hôte pourra être cultivé plus de quatre semaines sans risque de multiplier les *Meloidogyne*. D'autres variétés sont mauvais hôtes. À ce statut de plante non-hôte ou sensible vient se greffer la teneur en dhurrine qui lors de sa dégradation va avoir son propre effet sur les nématodes.

Des études montrent également que les apports de matière organique compostée (végétale ou animale) augmentent la tolérance des plantes aux nématodes et ont une action bénéfique sur les prédateurs ou parasites de nématodes présents naturellement dans le sol. Les substances volatiles produites lors de leur décomposition (biofumigation) peuvent avoir un effet sur les nématodes à galles. Le fumier de cheval, par exemple, associé à d'autres techniques de protection a été efficace dans les essais conduits dans le cadre du projet « Gedubat » au CTIFL de Balandran. Les systèmes de cultures utilisant du fumier à raison de 25-30 t/ha/an avant

la culture de printemps/été ont permis de diminuer les maladies telluriques en augmentant l'activité biologique du sol et en diversifiant les successions de plantes non hôtes, de plantes pièges et d'engrais verts. L'application de fumier doit être adaptée suivant la région, le type d'élevage, le niveau de compostage du fumier, mais aussi suivant la réglementation de la Directive Nitrate.

On peut citer également le Racinet (ancien nom : Nemaquill), homologué en tant que matière fertilisante¹⁴. Il est donné comme « matière organique liquide riche en chitinase ». Il agirait à pH acide grâce à des enzymes et toxines de champignons. Il n'a pas encore été étudié dans les projets du GIS PICLég mais les essais conduits au GRAB sur des essais en sol calcaire en 2008 (20 l/ha sur melon-salade) et 2013 (40 l/ha sur tomates, courgettes, piments) en agriculture biologique contre les *Meloidogyne* n'ont montré aucun effet des apports en comparaison à des témoins sans apports. Dans les Alpes Maritimes, des essais réalisés chez des producteurs en sol limono-argileux semblent plus prometteurs (meilleure vigueur des plantes même si le nombre de galles ne diminue pas). Il pourrait être testé à nouveau dans le cadre du projet « GoNem » pour valider son intérêt dans la protection contre les nématodes.



> ESSAI DE DIFFÉRENTES VARIÉTÉS DE SORGHO EN VUE DE GÉRER LES MELOIDOGYNE

PROTECTION VIA LES PRATIQUES CULTURALES

Ces techniques nécessitent une bonne connaissance du cycle biologique de l'espèce de nématode présente afin que la culture mise en place ait une action efficace pendant le cycle de développement. Même si leur intérêt est connu, les pratiques culturales ont fait l'objet de relativement peu d'études dans le cadre des actions entreprises sous l'égide du GIS

¹⁴ À ce titre, il ne peut pas être fait d'allégation se référant à une activité de phytoprotection. Pour mieux comprendre les aspects réglementaires autour des produits de biocontrôle se reporter au hors-série Infos-Ctifl dossier légumes : le biocontrôle.



PICléG. La protection culturale inclut : le travail du sol, l'apport d'amendement organique ou de tourteaux « nématocides », les plantes pièges associées, les rotations culturales. Parmi les pratiques culturales ayant un fort impact sur les communautés de nématodes phytoparasites, il faut citer la rotation des cultures (**voir fiche technique 4 « L'utilisation raisonnée des résistances et rotations »**) en particulier l'augmentation de la diversité des cultures appartenant à des familles botaniques différentes et son allongement. Néanmoins, souvent se pose la question des débouchés. Les travaux de Garcia (2017) ont montré que certaines variables physico-chimiques tels que le pH, le pourcentage en particules fines ou rapport le ratio C/N vont jouer sur les abondances ou encore les espèces présentes. Le labour en modifiant en profondeur la structure des sols modifie aussi la structure des communautés d'organismes du sol dont les nématodes phytoparasites, y compris les *Meloidogyne*. La fréquence du travail de sol en profondeur intervient également. **Les projets issus du GIS PICléG ont permis d'identifier différentes combinaisons possibles entre une culture, son itinéraire technique et les facteurs environnementaux comme la date de plantation/semis et la pression parasitaire initiale. Ils s'accordent à ne pas favoriser une seule technique mais bien à combiner les moyens de protection alternatifs contre les nématodes à galles et à diversifier les cultures sur son système.**

NOUVELLES VOIES DE RECHERCHE

D'autres voies de recherche sont en cours 1/ pour améliorer l'efficacité des mycorhizes via des plantes donneuses mycorhizotrophes, 2/ sur des molécules nématocides commercialisées en Afrique du Sud extraites de Cucurbitacées sauvages et qui devraient arriver en Europe, 3/ sur des biopesticides issus de plantes qui sont soit en attente d'homologation comme les molécules issus de tagètes, soit qui viennent

TENIR COMPTE DE LA DIVERSITÉ DES COMMUNAUTÉS DE NÉMATODES

D'après Thierry Mateille (IRD Montpellier), l'une des principales difficultés de l'étude et de l'application des stratégies de gestion des Nématodes phytoparasites (NPP) provient de leur non durabilité écologique. En effet, la plupart des leviers agronomiques développés à ce jour (protections génétique, culturale et biologique) sont mis au point vis-à-vis d'une espèce de NPP ou de quelques espèces d'un même genre. L'activation de ces leviers permet d'atteindre efficacement et rapidement un seuil de nuisibilité acceptable pour la culture en place, voire de diminuer fortement la population du parasite ciblé. Mais, les NPP sont partout présents en communautés, au sens de mélanges d'espèces et de genres, tous parasites. Par conséquent, on constate qu'à long terme, ces leviers entraînent une érosion de la richesse (soustraction de l'espèce ciblée) et/ou un réarrangement de la structure des communautés (richesse identique mais modification des proportions relatives des espèces) créant ainsi une nouvelle communauté dominée par une nouvelle espèce. Il s'avère que dans certains cas, cette nouvelle communauté peut être plus pathogène que la précédente.

En revanche, en particulier dans les systèmes naturels et les agrosystèmes peu contraints, on rencontre des communautés de NPP très diversifiées au pouvoir pathogène faible, voire nul. Ainsi, sans pour autant négliger le potentiel « nématocide » intrinsèque de chaque méthode de protection, il devient nécessaire de diversifier et de combiner les techniques de gestion des nématodes pour promouvoir et maintenir des communautés de NPP non ou peu pathogènes.

La stratégie de gestion élaborée aura donc un effet sur l'espèce ciblée mais également sur l'organisation et le fonctionnement des communautés et donc sur la durabilité du système. Cette approche appréhende la diversité des communautés de NPP en tenant compte des aspects qualitatifs (quelles espèces sont présentes dans le sol) et quantitatifs (effectifs des individus par espèce). Elle considère les interactions compétitives qui existent entre plusieurs espèces au sein d'une communauté dans un écosystème donné, et a pour objectif de maintenir leurs populations dans des situations de compromis (« trade-off ») non ou faiblement préjudiciables pour la production végétale. Cette approche permet de considérer la structure de la diversité communautaire en tenant compte des aspects qualitatifs (quelles espèces sont présentes dans le sol) et quantitatif (nombre total de nématodes présents dans le sol).

d'être homologuées comme le NEM-GUARD à base d'ail, 4/ sur la recherche de plantes résistantes à de multiples stress, biotiques (nématodes, bactéries, champignons telluriques) et abiotiques (haute température, sécheresse, salinité...).

Quel que soit le moyen d'action utilisé contre les nématodes, toutes les techniques appliquées expérimentalement concluent unanimement pour l'utilisation combinée, raisonnée et diversifiée des méthodes de protection, soit par la diversification des variétés, des espèces végétales, la combinaison de plantes mauvaises hôtes ou non hôtes avec une technique thermique ou encore l'application de variétés résistantes pour se

protéger des nématodes à galles sur du long terme (voir encadré sur la diversité).

Des fiches techniques détaillant les techniques de protection contre les *Meloidogyne* ont été rédigées et seront consultables via le site internet GIS PICléG et le portail ECOPHYTOPIC « cultures légumières » :

- fiche technique n° 1 « Diagnostic racinaire et analyse de sol » ;
- n° 2 « Prophylaxie » ;
- n° 3 « Solarisation » ;
- n° 4 « L'utilisation raisonnée des résistances et rotations » ;
- n° 5 « Biofumigation » ;
- n° 6 « Biodésinfection » ;
- n° 7 « Plantes de coupure ». ■



GLOSSAIRE ET ABRÉVIATIONS

Abiotique : la résistance aux contraintes abiotiques correspond aux contraintes liées au milieu comme la texture du sol, le stress hydrique, le pH, la température, la présence de traces de métaux lourds..., et donc indépendantes des organismes vivants, « -a » préfixe de privation, non-vivant.

AMM : Autorisation de mise sur le marché. Délivrée par l'agence d'évaluation française l'ANSES et concerne les spécialités commerciales. Les substances actives sont, quant à elles, autorisées au niveau de l'Union européenne. C'est le règlement 1107/2009 qui définit les conditions d'évaluation et d'autorisation.

Bioagresseur tellurique (BAT) : agent pathogène et ravageur effectuant tout ou partie de son cycle dans le sol et attaquant les cultures commerciales et autres végétaux (adventices, fleurs...). Il existe différents types de BAT : des champignons, des insectes, des nématodes dont le genre *Meloidogyne*, des bactéries et quelques virus.

Biocontrôle : concerne toutes les techniques de protection employant des moyens naturels tels que des micro-organismes (bactéries, mycorhizes, autres champignons), les extraits de plantes. Dans la loi d'avenir, les produits de biocontrôle sont des agents et produits utilisant des mécanismes naturels dans le cadre de la lutte intégrée contre les ennemis des cultures. Ils comprennent en particulier : 1) les macro-organismes ; 2) les produits phytopharmaceutiques comprenant des micro-organismes, des médiateurs chimiques comme les phéromones et les kairomones et des substances naturelles d'origine végétale, animale ou minérale (Art. L.253-6 du CRPM), pour plus de détails se reporter au hors-série Infos-Ctif « Dossier légumes, le biocontrôle ».

Biofumigation : méthode biologique visant à contrôler le développement de bioagresseurs dans le sol par l'utilisation de plantes ayant des effets allélopathiques avec production in situ d'un fumigant ou par l'apport de bouchons ou granulés. Nécessite la culture, la coupe et le broyage fin de la matière fraîche végétale qui libère ainsi des substances sous forme de gaz maintenu dans le sol par le passage du rouleau (voir fiche technique 5 « Biofumigation »).

Biodésinfection anaérobie par bûchage (ASD : anaerobic soil disinfection, mis au point en Hollande), appelé en anglais biodesinfestation, consiste à incorporer dans le sol de la matière organique fraîche broyée et bûchée, à arroser, puis à recouvrir

d'un film pratiquement étanche aux gaz (film VIF - Virtual Impermeable films - et TIF - Totaly Impermeable films - correspondant à la norme européenne NF EN 17098-1) pour limiter l'apport d'oxygène à la couche arable, et à laisser six semaines en été pour assainir le sol. Elle modifie l'équilibre microbien en jouant sur l'atmosphère du sol et le cycle de l'azote (voir fiche technique 6 « Biodésinfection »).

BM : La biomasse microbienne de l'ensemble des micro-organismes présents dans le sol.

CETA : Centre d'étude technique et agricole.

CNOPSAV : Conseil national d'orientation de la politique sanitaire animale et végétale.

CROPSAV : Conseil régional d'orientation de la politique sanitaire animale et végétale.

CRPM : Code rural et de la pêche maritime.

CTPS : Comité technique permanent de la sélection des plantes cultivées.

Endophyte : qui effectue tout ou partie de son cycle à l'intérieur « endo- » d'une plante (des tissus végétaux).

Engrais vert (EV) : un engrais vert est initialement cultivé dans le but d'améliorer la structure et la fertilité du sol. Dans le cadre d'une utilisation comme méthode de protection contre *Meloidogyne*, il permet soit de piéger les nématodes à galles (plante sensible ou mauvais-hôte) s'il est enfoui suffisamment tôt dans le sol (avant la fin du cycle), soit de jouer le rôle de plante de coupure (s'il est non-hôte), et donc de diminuer la pression parasitaire.

Exophyte : qui effectue toute ou partie de son cycle à l'extérieur « exo- » d'une plante (des tissus végétaux).

FMSE : Fonds national agricole de mutualisation du risque sanitaire et environnemental.

Gène R : gène de résistance. La résistance peut être partielle ou complète empêchant la reproduction d'une espèce voir une race de nématode. La plante R n'exprimera pas ou peu les symptômes ce qui permettra d'obtenir une récolte sans perte de rendement, voire sans galle si la résistance est totale.

Hypersensibilité (RH ou HR : hypersensitive response) : la réponse hypersensible à un bioagresseur est la conséquence d'une réaction physique et chimique d'une plante pour combattre un agent parasite.

IG : L'Indice de Galles racinaires est une échelle de notation comprise entre 0 et 10, échelle de Zeck (1971) qui permet d'estimer l'intensité des galles sur les racines et de déterminer l'ampleur de l'attaque des *Meloidogyne* sur une culture (voir fiche technique 1 « Diagnostic racinaire et analyse de sol »).

Inoculum : caractérise tout élément d'un bioagresseur capable de contaminer un hôte.

INR : Indice de nécrose racinaire.

Juvenile J2 (ou L2) : juvénile est le terme scientifique correct employé pour désigner vulgairement une larve. Le juvénile J2 est le second stade de *Meloidogyne*, unique stade mobile dans le sol de ce genre de nématode avant qu'il ne pénètre dans la racine. Les J2 constituent la phase pré-infectieuse et sont appelées parfois (à tort) nématodes libres¹⁵. Ce stade est parfois décrit comme « phase libre » dans la littérature.

Protection chimique : méthode de protection contre les bioagresseurs au moyen de produits phytopharmaceutiques de synthèse ou au moyen d'extrait de plante.

Meloidogyne spp. : nématodes à galles (différant des nématodes à kystes), phytoparasites et polyphages. Ils provoquent d'importants dégâts (galles racinaires et dépérissement des plants), favorisent la pénétration d'autres bioagresseurs telluriques et des pertes de rendement en culture maraîchère sous-abri et en plein champ.

Matière organique (MO) du sol : composante du sol constituée de résidus végétaux et animaux à divers stades de décomposition, de cellules et de tissus d'organismes du sol ainsi que de substances synthétisées par ces organismes. Elle est le principal réservoir de carbone biodisponible du sol et constitue donc la réserve en éléments nutritifs pour les plantes.

NPP : Nématodes non phytoparasites (= nématodes libres toute leur vie, sans stylet buccal) différant des nématodes à galles ayant une seule phase libre durant leur cycle (L2).

Nématostatique : qualifie une substance qui paralyse temporairement les nématodes sans les tuer.

Nématocide : qualifie une substance qui tue les nématodes, empêchant toute reproduction.

PCR (Polymerase chain Reaction) : technique d'amplification enzymatique d'ADN in vitro qui permet d'ob-



GLOSSAIRE ET ABRÉVIATIONS (SUITE)

tenir un très grand nombre de copies d'une séquence d'ADN choisie. Elle permet de détecter et quantifier rapidement un bioagresseur par son matériel génétique. Dans notre cas, la PCR utilisée par les laboratoires permet aux producteurs de connaître l'espèce de *Meloidogyne* présente sur leur parcelle.

Prophylaxie : ensemble de mesures préventives de protection qui permettent d'éviter l'introduction d'une maladie ou d'un ravageur dans une exploitation et de réduire le risque de sur-infestation.

Résistance : la résistance d'une plante correspond à sa capacité à résister à un bioagresseur et à réduire sa multiplication. Elle est toujours corrélée à un bioagresseur donné. Pour effectuer son choix variétal, il est donc important de connaître l'espèce présente sur la parcelle infestée via une analyse de sol ou de racines contaminées.

RI (résistance intermédiaire) : une plante avec une RI aux nématodes sera partiellement résistante, elle permet une légère reproduction des nématodes à galles et qui ne présente que quelques galles sur les racines.

RT (résistance totale) : une plante avec une RT aux nématodes ne permet pas la reproduction des nématodes à galles et ne présente aucune galle sur les racines.

Solarisation : méthode d'assainissement des sols obtenue par l'élévation des températures du sol en utilisant l'énergie solaire (genre de pasteurisation) pendant une durée suffisamment longue supérieure à 45 jours (voir fiche technique 3 « Solarisation »).

Seuil de nuisibilité (biologique ou économique) correspond au niveau de pression des nématodes en dessous duquel il n'y a pas de perte de rendement. Ce seuil est variable et

fonction de plusieurs critères déterminés selon la culture, la saison, les IG pour les *Meloidogyne*.

Taxon : groupe d'organismes désigné par une espèce comme *Meloidogyne hapla* ou un genre comme *Meloidogyne*.

Virulence d'un pathogène qualifie sa capacité à attaquer une plante résistante. Elle se définit par rapport à un gène donné : les nématodes virulents vis-à-vis du gène Mi de la tomate peuvent contourner la résistance de la tomate R-Mi et se multiplier sur cette plante résistante.

¹⁵ Les nématodes libres sont d'autres nématodes, soit migrateurs endoparasites des racines tels que le genre *Pratylenchus* spp., soit saprophytes (non phytoparasites)

BIBLIOGRAPHIE

Alabouvette C., Olivain C., & Steinberg C., 2005. Maîtrise des communautés microbiennes pour lutter contre les maladies d'origine tellurique : 571-588. In : Regnault-Roger C., Fabres G., Philogène B.J.R. Enjeux phytosanitaires pour l'agriculture et l'environnement. Eds. Tec & Docs. Paris, France.

Barker, K.R., Koenning, S.R., 1998. Developing sustainable systems for nematode management. Annual Review of Phytopathology, 36, 165-205. <https://doi.org/10.1146/annurev.phyto.36.1.165>

Bertrand C., 2001. Lutter contre les nématodes à galle en agriculture biologique. Fiche technique GRAB/ITAB : 4 p.

Bird A.F. & Wallace H.R., 1965. The influence of temperature on *Meloidogyne hapla* and *M. javanica*. *Nematologica* 11 : 581-589.

Bird A.F., 1972. Influence of temperature on embryogenesis in *Meloidogyne javanica*. *Journal of nematology*, 3 : 206-13.

Blok V.C., Jones J.T., Phillips M.S., Trudgill D.L., 2008. Parasitism genes and host range disparities in biotrophic nematodes : the conundrum of polyphagy versus specialisation. *BioEssays : news and reviews in molecular, cellular and developmental biology*, 30 : 249-59.

Charchar J.M. & Santo G.S., 2008. Generation time and tuber infection by *Meloidogyne chitwoodi* Race 1 and *M. Hapla* on 'Russet Burbank' potato in field microplots. *Nematologia Brasileira* 32 : 333-337.

Chellemi D.O., Olson S.M., Mitchell D.J., Secker I., McSorley R., 1997. Adaptation of soil solarization to the integrated management of soil-borne pests of tomato under humid conditions. *Phytopathology* 87 : 250-258.

Davide R.G., Triantaphyllou A., 1967. Influence of the environment on development and sex differentiation of root-knot nematodes II. Effect of host nutrition. *Nematologica* 13 : 111-117.

Davide R.G., 1980. Influence of cultivar, age, soil texture, and pH on *Meloidogyne incognita* and *Radopholus similis* on banana. *Plant diseases* 64 : 571-573.

Davila M., Dickson D.W., 2004. Base temperature and heat unit requirements for development of *Meloidogyne arenaria* and *M. javanica*. *Journal of nematology* 36 : 314

Davila M., Allen L.H., Dickson D.W., 2005. Influence of soil temperatures under polyethylene mulch and bare soil on root-knot nematode egg laying. *Journal of Nematology*, 37/364-365

Decraemer W., Hunt D.J., 2006. Structure and classification. In : *Plant Ne-*

matology. Perry, R.N. & Moens, M. (eds) : 3-32. Wallingford, Oxfordshire : CAB International

De Guiran G., 1983. Nématodes, les ennemis invisibles. La Littorale S.A. (Ed.), France : 41 p.

De Guiran G., 1993. Protection des cultures maraîchères et fruitières face aux capacités d'adaptation des nématodes *Meloidogyne*. *Compte Rendu de l'Académie d'Agriculture de France* : 71-78.

De Guiran G., 1998. Protection des cultures maraîchères. *Compte Rendu de l'Académie d'Agriculture de France* 71-79.

De Guiran G., Netscher, C., 1970. Les nématodes du genre *Meloidogyne*, parasites de cultures tropicales. *Cahier ORSTOM sér Biol*, 11 : 151-185.

Demeure Y., 1978. Les causes de la survie de certains nématodes phytoparasites pendant la saison sèche dans le Sahel Sénégalais. Thèse de l'université Claude Bernard-Lyon I. Paris : ORSTOM : 113 p.

Djian-Caporalino C., Bourdy G., Cayrol J.C., 2008. Plantes nématicides et plantes résistantes aux nématodes : 125-185. In : *Biopesticides d'origine végétale : potentialités phytosanitaires*. Regnault-Roger, C., Philogène, B.Jr., Vincent, C. (Eds), France-Canada, Editions Lavoisier (première édition en 2002).



BIBLIOGRAPHIE (SUITE)

Djian-Caporalino C., 2010. Nématodes à galles, des ravageurs de plus en plus préoccupants. Résultats de 3 ans d'enquêtes dans 15 régions françaises. *Phytoma La défense des Végétaux*, 638 : 1-7

Djian-Caporalino C., 2012. Root-knot nematodes (*Meloidogyne* spp.), a growing problem in French vegetable crops. *EPPO Bulletin*, 42 : 127-137

Eisenback J.D., 1985. Detailed morphology and anatomy of second-stage juveniles, males and females of the genus *Meloidogyne* (root-knot nematodes) : 47-77. In : *An advanced treatise on Meloidogyne*, Vol 1. Sasser J.N. & Carter C.C. (eds), North Carolina State University Graphics, Raleigh, NC, USA.

Evans A.A.F. & Perry R.N., 2009. Survival mechanisms : 201-222. Chapter : 9. In : *Root-knot nematodes*. Perry, R. N. Moens, M. Starr, J. L. (Eds), CABI.

Garcia N., 2017. Analyse exploratoire des variables structurant la capacité des communautés de nématodes phytoparasites à limiter l'implantation du nématode de quarantaine *Meloidogyne chitwoodi*. Thèse Agroparc Ovest, 173 p.

Gobat J.M., Aragno M., Matthey W., 2003. *Le sol vivant*. 2^e édition revue et complétée. Presses Polytechniques et Universitaires Romandes, Lausanne, 568 pp.

Gong B., Bloszies S., Li X., Wei M., Yang F., Shi Q., Wang X., 2013. Efficacy of garlic straw application against root-knot nematodes on tomato. *Scientia Horticulture* 161 : 49-57.

Inserra R.N., Griffin G.D., Sisson D.V., 1983. Effects of temperature and root leachates on embryogenic development and hatching of *Meloidogyne chitwoodi* and *M. hapla*. *Journal of nematology*, 15 : 123-127.

Jones M., 1981. The development and function of plant cells modified by endoparasitic nematodes : 225-279. In : *Plant Parasitic Nematodes*, B.M. Zuckerman and R.A. Rhode (eds). Academic Press, New York.

Jones J.T., Haegeman A., Danchin E.G.J., Gaur H.S., Helder J., Jones M.G.K., Kikuchi T., Manzanilla-López R., Palomares-Rius J.E., Wesemaël W.M.L., Perry R.N., 2013. Top 10 plant-parasitic nematodes in molecular plant pathology. *Molecular Plant Pathol* 14 : 946-961.

Jourand P. Rapior S., Fargette M., Mateille T., 2004a. Nematostatic effects of a leaf extract from *Crotalaria virgulata* subsp. *grantiana* on

Meloidogyne incognita and its use to protect tomato roots. *Nematology*, 6, 79-84

Jourand P. Rapior S., Fargette M., Mateille T., 2004 b. Nematostatic activity of aqueous extracts of West African *Crotalaria* species. *Nematology* 6 : 765-771.

Katan J., 1981. Solar heating (solarisation) of soil for control of soil-borne pests. *Phytopathology* 19, 211-236

Koenning S.R., Walters S.A., Barker K.R., 1996. Impact of soil texture on the reproductive and damage potentials of *Rotylenchulus reniformis* and *Meloidogyne incognita* on Cotton. *Journal of nematology* 28 : 527-536.

Korayem A.M. Romaşcu E., 1983. Effect of environmental factors on root-knot nematode *Meloidogyne incognita* development infected tomato. I- Effect of temperature, humidity and soil salinity. 8th National Conference of Plant Protection. 8-10 sept. 1983. Agronomic Institut « Ion Ionescu de la Brad », Iasi, Romania.

Lahtinen A.E., Trudgdill D.L., Tulikkala K., 1988. Threshold temperature and minimum thermal time requirements for the complete life cycle of *M. hapla* from northern Europe. *Nematologica* 34 : 443-451.

Launais M., Bzdrenga L., Estorgues V., Faloya V., Jeannequin B., Lheureux S., Nivet L., Scherrer B., Sinoir N., Szilvasi S., Taussig C., Terrentroy A., Trotin-Caudal Y., Villeneuve F., 2014. Guide pratique pour la conception de systèmes de culture légumiers économes en produits phytopharmaceutiques, Ministère chargé de l'agriculture, Onema, GIS PICleg, 178p.

L'Etang M., 2012. Effet de différents paramètres de l'environnement sur le déterminisme biochimique d'exsudats racinaires de *Crotalaria* spp. : Application à la nématoregulation en production végétale. Thèse à l'Université des Antilles et de la Guyane.

Mahmud MR, 2014. The importance of the gelatinous matrix for the survival of eggs of *Meloidogyne chitwoodi* and *M. fallax*. Thesis of Master of Science in Nematology, Ghent University.

Maleita C., Curtis R., Abrantes I., 2012a. Thermal requirements for the embryonic development and life cycle of *Meloidogyne hispanica*. *Plant pathology*, 61 : 1002-1010

Maleita C., Curtis R., Powers S.J., Abrantes I., 2012b. Host status of cultivated plants to *Meloidogyne hispanica*. *European Journal of Plant Pathology*, 133 : 449-460

Mateille T., 1993. La submersion des sols en bananeraie : une technique naturelle de lutte contre les nématodes phytoparasites. *Bulletin RADHORT*, 6: 58-61.

McClure M.A. & Robertson J., 1973. Infection of cotton seedling by *Meloidogyne incognita* and a method of producing uniformly infected root segments. *Nematology* 19 : 428-434.

McSorley R., 2003. Adaptations of nematodes to environmental extremes. *Florida entomologist* 86 : 138-142.

Messiaen C., Blancard D., Rouxel F., & Lafon R., 1991. Les maladies des plantes maraîchères. Editions INRA. Paris, France : 552 p.

Milne D.L., & Du Plessis D.P., 1964. Development of *Meloidogyne javanica* (Treb.) Chit. on tobacco under fluctuating soil temperatures. *South African Journal of Agricultural Science* 7 : 673-680.

Mugniéry D., 2005. Les nématocides et la lutte chimique contre les nématodes. In *Enjeux phytosanitaires pour l'agriculture et l'environnement*. Regnault-Roger C., Fabres G., Philogène B.J.R.éd. Lavoisier, pp 115-135

Navarrete M., Djian-Caporalino C., Mateille T., Palloix A., Sage-Palloix A.M., Lefèvre A., Fazari A., Marteu N., Tavoillot J., Dufils A., Furnion C., Pares L., Forest I., 2016. A resistant pepper used as a trap cover crop in vegetable production strongly decreases root-knot nematode infestation in soil. *Agron. Sustain. Dev.* 36 : 68.

Peyre, G., 2007. Systèmes de culture et gestion des nématodes en cultures maraîchères sous abri : diagnostic en parcelles d'agriculteurs. Mémoire. Ecole nationale d'ingénieurs des travaux agricoles de Clermont-Ferrand. 162 p.

Philips A.J.L., 1990. The effects of soil solarisation on sclerotial populations of *Sclerotinia sclerotiorum*. *Plant Pathology* 39 : 38-43.

Ploeg A.T. Maris P.C., 1999. Effects of temperature on the duration of the life cycle of a *Meloidogyne incognita* population. *Nematology* 1 (4) : 389-393.

Prot J.C., 1975. Recherches concernant le déplacement des juvéniles de *Meloidogyne* spp. vers les racines. *Cah ORSTOM sér Biol* 10 : 251-262.

Prot J.C., 1977. Amplitude et cinétique des migrations de nématodes *Meloidogyne javanica* sous l'influence d'un plant de tomate. *Cah ORSTOM sér Biol* 11 : 157-166.



BIBLIOGRAPHIE (SUITE)

Prot J.C., Van Gundy S.D., 1981. Effect of soil texture and the clay component on migration of *Meloidogyne incognita* second stage juveniles. *Journal of nematology* 13 : 213-219.

Reversat G., 1986. Recherche sur la survie et le métabolisme énergétique des stades infestants chez *Heterodora oryzae*, *Meloidogyne javanica* et *Hirschimaniella spinicaudata*, nématodes phytoparasites de la zone intertropicale. Thèse Sci. Nat., Université Pierre et Marie Curie, ORSTOM : 278 p.

Rohini H.M., Ekanayake K., Di Vito M., 1986. Life cycle and multiplication of *M. incognita* on tomato plant seedlings. *Tropical Agriculturist* 142 : 59-68

Robinson A.F., Cook C.G., Bridges A.C., 1998. Comparative reproduction of *Rotylenchulus reniformis* and *Meloidogyne incognita* race 3 on kenaf and sunn hemp grown in rotation with cotton. *Nematropica* 28 : 143 (Abstr).

Sayre R.M., Patrick Z.A., Thorpe H.J., 1964. Substances toxic to plant parasitic nematodes in decomposing plant residue. *Phytopathology* 54 : 905.

Sayre R.M., Patrick Z.A., Thorpe H.J., 1965. Identification of a selective nematicidal component in extracts of plant residues decomposing in soil. *Nematologica* 11 : 263-268.

Sikora R.A., Bridge J., Starr J.L., 2005. Management Practices : An overview of integrated nematode management technologies : 793-825. In *Plant Parasitic Nematodes in Subtropical and Tropical Agriculture*, Luc M., Sikora R.A., and Bridge J. (eds). Wallingford : CAB International.

Stapleton J.J., 2000. Soil solarization in various agricultural production systems. *Crop Protection* 19 : 837-841.

Stirling G.R., Smith L.J., 1998. Field tests of formulated products containing either *Verticillium chlamydosporium* or *Arthrobotrys dactyloides* for biological control of root-knot nematodes. *Biological Control* 11 : 231-239.

Tada M., Hiroe Y., Kiyohara S., Suzuki S., 1988. Nematicidal and antimicrobial constituents from *Allium grayi* Regel and *Allium fistulosum* L. var. *caespitosum*. *Agricultural and Biological Chemistry* 52 : 2383-2385.

Taylor A.L. & Sasser J.M., 1978. *Biology, identification and control of root-knot nematodes*. North Carolina State Univ Graphics : 110 p.

Thoden T.C., Boppré M., Hallmann J., 2009. Effects of pyrrolizidine alkaloids on the performance of plant-parasitic and free-living nematodes. *Pest Management Science* 65 : 823-830.

Thomason I.J., Lear B., 1961. Rate of reproduction of *Meloidogyne* spp. as influenced by soil temperature. *Phytopathology* 51 : 520-524.

Trudgill D.L., Perry J.N., 1994. Thermal time and ecological strategies - a unifying hypothesis. *Annals of applied biology* 125 : 521-532.

Triantaphyllou A.C., 1985. Cytogenetics, cytotaxonomy and phylogeny of root-knot nematodes : 113-126. In : *An Advanced Treatise on Meloidogyne*, vol. 1. Sasser J.N., Carter C.C. (eds). North Carolina State University Graphics : Raleigh.

Tsai B.Y., 2008. Effect of temperature on the survival of *Meloidogyne incognita*. *Plant Pathology* 17 : 203-208.

Védie H., Aïssa-Madani C., 2009. Evaluation de l'effet du DMDS sur les nématodes à galles (*Meloidogyne* spp.) en maraîchage sous abri. *C.R. Essai du GRAB* : 6 p.

Védie H., Geffroy T., Lambion J., 2006. Lutte contre les nématodes à galles : test de différents engrais verts nématocides : compte-rendu d'essai 2005. Groupe de Recherche en Agriculture Biologique (Ed). *Maraîchage 2006*, Fiches action L05 & L06 LR/02. <http://www.grab.fr/cd2006/FicheMaraichLR2EVnematicides2006.pdf>

Védie H., Lambion J., 2007. Lutte biologique contre les nématodes à galles : bilan des essais du GRAB. *Maraîchage BioInfos* n° 46, janvier-Février 2007 : dossier spécial nématodes.

Villeneuve F., Djian-Caporalino C., Szilvasi S., 2013. Les nématodes et les cultures légumières. *Biologie et contexte réglementaire* (1^{re} partie). *Infos-Ctifl*, Mars 2013, n° 289, 41-50.

Villeneuve F., Djian-Caporalino C., 2013. Les nématodes et les cultures légumières. *La protection des cultures* (2^e partie). *Infos-Ctifl*, Mai 2013, n° 291, 66-76.

Von Mende N., 1997. Invasion and migration behaviour of sedentary nematodes : 51-64. In : *Cellular and Molecular Aspects of Plant-Nematode Interactions*, Vol 10. Fenoll C., Grundler F.M.W., & Ohl S.A. (eds). Kluwer Academic Publishers.

Vrain T.C., Barker K.R., Holtzman G.I., 1978. Influence of low temperature on rate of development of *Meloidogyne incognita* and *M. hapla* larva. *Journal of Nematology* 10 : 166-171

Wallace H.R., 1968. The dynamic of Nematode movement. *Annu. Rev. Phytopathol.* 6, 91-114.

Wesemael W.M.L., Viaene N., Moens M., 2011. Root-knot nematodes (*Meloidogyne* spp.) in Europe. *Nematology* 13 (1) : p. 3-16.

Wesemael W.M.L., Taning L.M., Viaene N., Moens M., 2014. Life cycle and damage of the root-knot nematode *Meloidogyne minor* on potato, *Solanum tuberosum*. *Nematology* 16 : 185-192

Widmer T.L. & Abawi G.S., 2000. Mechanism of suppression of *Meloidogyne hapla* and its damage by a green manure of Sudan grass. *Plant disease* 84 : 562-568.

Wyss U., Grundler F., Munch A., 1992. The parasitic behaviour of 2nd-stage juveniles of *Meloidogyne incognita* in roots of *Arabidopsis thaliana*. *Nematologica* 38 : 98-111.

Yeates G.W., 1987. How plants affect nematodes. *Advances in Ecological Research* 17 : 61-113.

Yeates G.W., Bongers T., De Goede R.G.M., Freckman D.W., Georgieva S.S., 1993. Feeding habits in soil nematode families and genera - an outline for soil ecologists. *Journal of Nematology*, 25 : 315-331.

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

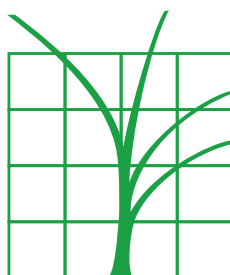
SITOGRAPHIE

OEPP-EPPO : List alert https://www.eppo.int/QUARANTINE/Alert_List/nematodes/Meloidogyne_ethiopica.htm

GIS PIClég : <https://www.picleg.fr>

Portail ECOPHYTOPIC, cultures légumières : <http://cultures-legumiere.ecophytopic.fr/cultures-legumieres>

Ctifl



Centre technique interprofessionnel
des fruits et légumes

Un centre technique... au service de toute l'interprofession

> Paris - siège

22 rue Bergère
75009 Paris
Tél. +33 (0)1 47 70 16 93
Fax. +33 (0)1 42 46 21 13

> Antenne de Rungis

1 rue de Perpignan
Bâtiment D3
Case postale 30420
94632 Rungis Cedex
Tél. +33 (0)1 56 70 11 30
Fax. +33 (0)1 45 60 58 02

> Centre opérationnel de Balandran

751 chemin de Balandran
30127 Bellegarde
Tél. +33 (0)4 66 01 10 54
Fax. +33 (0)4 66 01 62 28

> Centre opérationnel de Carquefou

ZI Belle Étoile - Antarès
35 allée des Sapins
44483 Carquefou
Tél. +33 (0)2 40 50 81 65
Fax. +33 (0)2 40 50 98 09

> Centre opérationnel de Lanxade

28 Route des Nébouts
24130 Prignonrieux
Tél. +33 (0)5 53 58 00 05
Fax. +33 (0)5 53 58 17 42

> Centre opérationnel de Saint-Rémy-de-Provence

Route de Mollégès
13210 St-Rémy-de-Provence
Tél. +33 (0)4 90 92 05 82
Fax. +33 (0)4 90 92 48 87

Le CTIFL est présent sur Internet

e-mail : « votre contact au CTIFL »
@ctifl.fr

Site : <http://www.ctifl.fr>

6 adresses à retenir

Faire fructifier l'avenir...

Action financée par

