



**HAL**  
open science

## Lutte contre les nématodes à galles en cultures maraîchères : des recherches pour promouvoir la durabilité des résistances variétales

Philippe Castagnone-Sereno, Caroline Djian-Caporalino

### ► To cite this version:

Philippe Castagnone-Sereno, Caroline Djian-Caporalino. Lutte contre les nématodes à galles en cultures maraîchères : des recherches pour promouvoir la durabilité des résistances variétales. *Innovations Agronomiques*, 2011, 15, pp.55-64. hal-02642460

**HAL Id: hal-02642460**

**<https://hal.inrae.fr/hal-02642460>**

Submitted on 28 May 2020

**HAL** is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.



Distributed under a Creative Commons Attribution - NonCommercial - NoDerivatives 4.0 International License

## Lutte contre les nématodes à galles en cultures maraîchères : des recherches pour promouvoir la durabilité des résistances variétales

Castagnone-Sereno P., Djian-Caporalino C.

INRA UMR1301/UNSA/CNRS UMR6243, Interactions Biotiques et Santé Végétale, F-06903, Sophia Antipolis

Correspondance : philippe.castagnone@sophia.inra.fr

### Résumé

Dans le contexte de l'interdiction programmée des nématicides chimiques, la résistance variétale est à l'heure actuelle l'alternative la plus sûre, la plus rentable et la moins polluante pour réduire les populations de nématodes phytophages sous leur seuil de nuisibilité. Des gènes majeurs de résistance ont été identifiés chez les Solanées maraîchères (gènes *Mi* chez la tomate, gènes *Me* chez le piment), qui contrôlent les trois espèces prédominantes de nématodes à galles (*Meloidogyne arenaria*, *M. incognita* et *M. javanica*). Cependant, le contournement de ces gènes par des populations virulentes de *Meloidogyne* pourrait réduire significativement la durée d'exploitation des variétés résistantes commercialisées. Dans ce contexte, les recherches actuelles menées à l'INRA concernent divers aspects complémentaires de la durabilité de la résistance de la tomate et du piment aux nématodes à galles : (1) l'évaluation des possibilités de contournement par le parasite de génotypes de tomate et de piment portant divers gènes de résistance, différents par le mécanisme de résistance mis en place, et l'analyse de la spécificité d'hôte (et de gène) de la virulence ; (2) l'étude de l'influence sur les populations de nématodes de la pression de sélection exercée par les différents gènes, utilisés dans un fond génétique sensible ou partiellement résistant ; (3) l'analyse comparative du potentiel reproductif de populations avirulentes ou virulentes, afin de mettre en évidence un éventuel coût de la virulence, en fonction du gène de résistance utilisé. Les informations obtenues permettent d'avoir une vision élargie des capacités de contournement des gènes de résistance des Solanées par les nématodes à galles, et également d'appréhender l'impact de ces gènes sur la fitness des populations du parasite. Au final, les résultats de ces recherches ont des implications directes sur les stratégies de sélection et/ou de gestion à mettre en place en vue d'assurer la durabilité de la résistance.

**Mots-clés** : durabilité, gestion, *Meloidogyne* spp., nématodes à galles, piment, résistance, sélection, tomate

### Abstract: Controlling root-knot nematodes in vegetable production: researches to promote durable plant resistances

Due to the recent withdrawal of most chemical nematicides, host plant resistance is currently considered as the most efficient, environmentally safe and financially viable method to control plant-parasitic nematodes. Major genes have been identified in solanaceous crops (e.g., *Mi* and *Me* genes in tomato and pepper, respectively), that confer resistance against the main root-knot nematode species (i.e., *Meloidogyne arenaria*, *M. incognita* and *M. javanica*). However, the occurrence of « resistance-breaking » (i.e., virulent) *Meloidogyne* populations able to overcome the resistance could significantly reduce the commercial exploitation of resistant cultivars. In this context, research conducted at INRA has dealt with several complementary aspects of the durability of tomato and pepper resistance against root-knot nematodes: (1) evaluating the ability of the nematodes to overcome tomato and pepper genotypes bearing various resistance genes that exhibit different resistance mechanisms, and analysing the specificity of the plant-nematode interaction; (2) studying the impact of the selection pressure of different resistance genes, introgressed in genotypes with susceptible or partially resistant backgrounds,

on root-knot nematode populations; (3) comparing the reproductive potential of avirulent *versus* virulent nematodes, in order to identify a possible fitness cost associated with virulence. The obtained results provide a more comprehensive understanding of the ability of root-knot nematodes to overcome resistance genes from solanaceous crops, and allow the assessment of the consequences of the use of these genes on the reproductive fitness of the nematodes. Finally, these data should have direct application for both crop selection and crop management strategies to implement in order to improve the durability of resistance in the field.

**Keywords:** durability, management, *Meloidogyne* spp., pepper, resistance, root-knot nematodes, selection, tomato

## Introduction

Les cultures maraîchères en plein champ ou sous abri sont la cible d'un cortège de parasites du sol, parmi lesquels les nématodes du genre *Meloidogyne*, qui induisent des symptômes caractéristiques (les galles) sur les racines attaquées. Du fait de leur gamme d'hôtes très étendue, ces bioagresseurs ont une incidence économique non négligeable, tout particulièrement dans les zones méditerranéennes de production où les conditions optimales de leur développement sont réunies : températures élevées et rotations traditionnelles faisant intervenir des espèces sensibles (Solanées et/ou Cucurbitacées en cultures d'été, salades en cultures d'hiver). Historiquement, la lutte contre ces parasites a été longtemps presque exclusivement basée sur l'emploi de nématicides chimiques, à l'aide de spécialités peu spécifiques qui conduisaient à une désinfection des couches superficielles du sol. Cependant, on assiste aujourd'hui à une réduction drastique de l'usage des pesticides suite à l'interdiction progressive de la plupart des matières actives, en raison de contraintes réglementaires et environnementales (évolution de la législation européenne sur les pesticides, plan Ecophyto 2018, etc.). Dans ce contexte, la pression parasitaire des nématodes à galles en cultures maraîchères est en nette augmentation, et se traduit par des pertes de rendement de plus en plus significatives. C'est notamment ce qui ressort d'une enquête récente (2007-2010) conduite par l'INRA dans la région Provence-Alpes-Côte d'Azur, laquelle met en évidence l'importance du problème, avec à ce jour plus de 40 % des exploitations touchées, qu'elles soient conduites de manière traditionnelle ou en agriculture biologique (Djian-Caporalino, 2010).

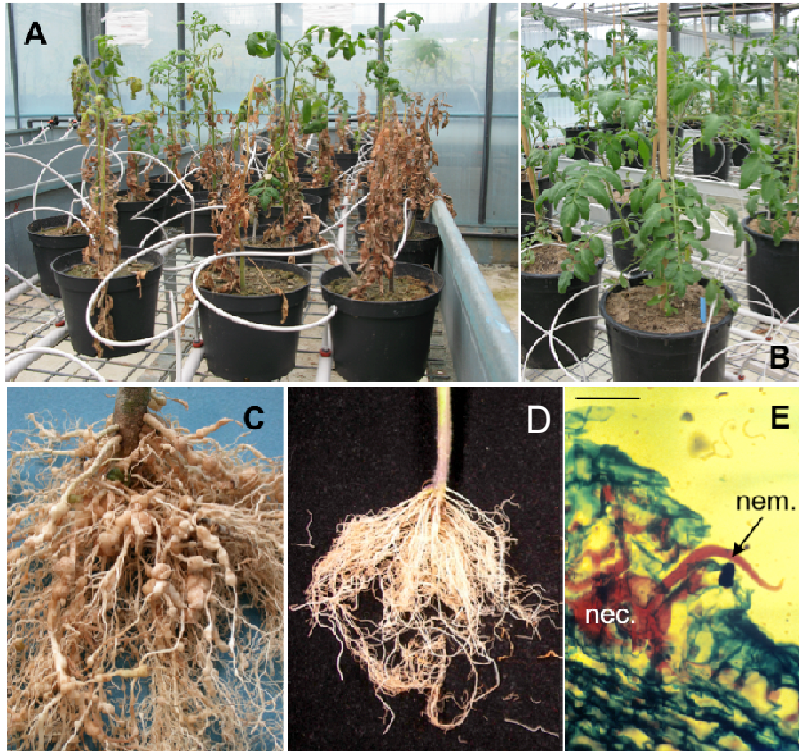
Associées à une prophylaxie rigoureuse, diverses stratégies alternatives de lutte contre les nématodes à galles peuvent être envisagées, parmi lesquelles des méthodes physiques (désinfection à la vapeur, solarisation), ou l'utilisation d'auxiliaires naturels (champignons nématophages, bactéries parasites), de plantes nématicides (biofumigation) ou de plantes pièges. Ces méthodes sont encore expérimentales, voire utilisées en pratique (à une échelle limitée) pour certaines d'entre elles, mais toutes font preuve d'une efficacité variable et souvent limitée. En fait, au vu des résultats expérimentaux disponibles à ce jour, l'introduction dans la rotation d'une plante résistante semble être la stratégie la plus satisfaisante, à la fois en terme d'efficacité et de viabilité économique. Cette approche est expérimentée par l'INRA depuis plusieurs années, en collaboration avec divers partenaires, afin de fournir aux sélectionneurs et aux agriculteurs des informations concrètes pour la création et la gestion durable de nouveaux cultivars résistants aux nématodes à galles.

## 1 - La résistance des Solanées maraîchères aux nématodes à galles

### 1.1 - Définition

Une plante est considérée « résistante » si elle est capable de développer un mécanisme actif de défense en réponse à l'attaque par le nématode, qui va bloquer son cycle de développement et ainsi empêcher sa multiplication. Vis-à-vis des espèces endoparasites sédentaires comme les nématodes à

galles, la résistance se traduit le plus souvent par la nécrose des cellules végétales autour du point d'infection par le nématode (Figure 1). Cette réponse de la plante, encore appelée « réaction d'hypersensibilité », va empêcher l'installation du parasite dans les tissus racinaires, et donc bloquer sa nutrition, son développement et sa reproduction. De ce fait, les racines des plantes attaquées ne présentent pas les galles typiques que l'on retrouve chez les plantes sensibles. A la différence des plantes tolérantes (c'est-à-dire qui supportent un certain niveau d'infestation, donc de multiplication du nématode, sans baisse de rendement), l'emploi de plantes résistantes présente un intérêt à la fois pour la culture en place (en diminuant les dégâts directs) et pour les cultures suivantes (en diminuant le potentiel infectieux du sol).



**Figure 1 :** La résistance aux nématodes à galles chez la tomate. Plantes sensibles (A) ou résistantes (B) inoculées avec le parasite. Les racines des plantes sensibles présentent des dégâts typiques, les galles (C), alors que celles des plantes résistantes sont indemnes (D). Observées sous le microscope, les nécroses d'hypersensibilité (nec.) bloquent la progression et le développement du nématode (nem.) chez les plantes résistantes (E) (photos INRA).

### 1.2 - Des gènes majeurs de résistance identifiés chez les Solanées

Les sources de résistance aux nématodes à galles répertoriées dans la littérature sont assez nombreuses, et couvrent une large gamme d'espèces végétales (Williamson et Roberts, 2009). Chez les Solanées maraîchères, des gènes majeurs et dominants ont été identifiés (Tableau 1), le plus souvent dans des espèces sauvages dont les qualités agronomiques ne sont pas compatibles avec les exigences de la production. En conséquence, des efforts importants de sélection sont requis pour introgresser ces gènes dans des cultivars d'intérêt. Par exemple, dans le cas de la tomate, neuf gènes de résistance sont connus à ce jour (*Mi-1* à *Mi-9*), mais seul *Mi-1* est disponible dans les variétés commercialisées, et les travaux actuels conduits par les sélectionneurs concernent essentiellement le gène *Mi-3*.

## 2 - Les limites de l'utilisation de la résistance variétale

### 2.1 - Disponibilité et spectre des gènes de résistance

Malgré l'intérêt indiscutable de la résistance variétale en tant que méthode alternative de gestion des populations de nématodes phytophages, l'analyse détaillée des résistances disponibles montre que les

gènes de résistance ne permettent pas de faire face à toutes les situations rencontrées dans la pratique agricole, du fait de leur distribution et de leur spécificité d'action :

- des gènes de résistance n'ont pas été trouvés dans toutes les espèces cultivées dans les rotations maraîchères classiques. C'est notamment le cas des Cucurbitacées (melon, courgette, etc.), des aubergines (à l'exception de certains porte-greffes) et des salades, pour lesquelles aucun génotype résistant n'a été identifié ;

- les gènes de résistance ne contrôlent pas toutes les espèces de nématodes à galles. C'est vrai en particulier pour *M. hapla*, dont la distribution semble s'étendre dans les régions du Sud de la France, ou encore pour *M. enterolobii*, une espèce très récemment incluse par l'OEPP dans la liste A2 des organismes de quarantaine du fait de son pouvoir pathogène (EPPO, 2010). Par exemple, les gènes *Mi(s)* ou *Me(s)* caractérisés chez la tomate et le piment, respectivement, ne contrôlent que les espèces *M. arenaria*, *M. incognita* et *M. javanica*. Une identification spécifique précise des parasites présents s'avère donc indispensable avant tout déploiement d'une résistance au champ.

**Tableau 1** : Les principaux gènes de résistance aux nématodes à galles chez les Solanées maraîchères

Espèce végétale	Gène de résistance	Nématodes contrôlés	Principales propriétés
Tomate cultivée ( <i>Solanum esculentum</i> )	<i>Mi-1.2</i>	<i>Meloidogyne arenaria</i> <i>M. incognita</i> <i>M. javanica</i>	Inactivé si température >30°C Contrôle également le puceron de la pomme de terre et le thrips Disponible dans de nombreuses variétés
Tomate sauvage ( <i>S. peruvianum</i> )	<i>Mi-3</i>	<i>M. arenaria</i> <i>M. incognita</i> <i>M. javanica</i>	Stable à haute température
Piment cultivé ( <i>Capsicum annuum</i> )	<i>Me1, Me3</i>	<i>M. arenaria</i> <i>M. incognita</i> <i>M. javanica</i>	Stables à haute température
Piment sauvage ( <i>Capsicum frutescens</i> )	<i>N</i>	<i>M. arenaria</i> <i>M. incognita</i> <i>M. javanica</i>	Introgressé dans de nombreuses variétés de piment cultivé
Pomme de terre sauvage ( <i>S. bulbocastanum</i> )	<i>R<sub>mc1</sub></i>	<i>M. chitwoodi</i> <i>M. fallax</i> <i>M. hapla</i>	

## 2.2 - Influence de la température sur l'expression de la résistance

Certains gènes de résistance perdent leur efficacité lorsque la température du sol dépasse les 30°C, ce qui peut limiter leur utilisation dans les régions tropicales, ou durant la saison chaude en cultures protégées dans les zones méditerranéennes. A titre d'exemple, l'inactivation du gène *Mi-1* de la tomate dans de telles conditions est un phénomène bien connu. *A contrario*, d'autres gènes ne sont pas affectés par des températures élevées, comme cela a été montré par exemple pour les gènes *Me1* et *Me3* du piment (Djian-Caporalino et al., 1999).

### 2.3 - Phénomènes de contournement de la résistance

Indépendamment des limites d'utilisation mentionnées plus haut, des symptômes classiques d'attaque par les nématodes à galles peuvent néanmoins être parfois décelés sur les racines de plantes résistantes. Selon l'intensité de ces symptômes, il s'agira soit d'un simple « échappement » de la résistance (présence de galles peu nombreuses, sans incidence grave), soit du phénomène beaucoup plus grave de contournement de la résistance. Dans ce dernier cas, tout ou partie de la population s'est adaptée à la résistance, et peut alors se développer comme s'il s'agissait d'une plante sensible. On parle alors de population « virulente » vis-à-vis du gène de résistance concerné (Castagnone-Sereno, 2002). Cette situation se rencontre le plus fréquemment dans les régions où la monoculture est pratiquée, et peut conduire en quelques cycles de culture à la perte totale d'efficacité du gène de résistance dans la parcelle ou le bassin de production en cause.

En cultures maraîchères, l'exemple le plus typique est celui du contournement du gène *Mi-1* de la tomate. Comme indiqué plus haut, le gène *Mi-1* est le seul gène de résistance actuellement présent dans les variétés de tomate. Ce gène, issu de l'espèce sauvage *Solanum peruvianum*, a été introgressé par croisement interspécifique dans la tomate cultivée au début des années 1940, et les premières variétés résistantes sont apparues sur le marché à la fin des années 1940. Depuis, d'innombrables variétés résistantes ont été commercialisées, mais toutes possèdent en réalité la même source de résistance. Pour cette raison, un changement de variété dans la rotation ne modifie pas la pression de sélection appliquée sur les populations parasites, puisqu'*in fine* le gène de résistance reste le même, et donc les risques de contournement sont aggravés. Et, de fait, les cas de contournement deviennent de plus en plus fréquents, dans les zones où la (mono)culture de tomate est pratiquée régulièrement. Ceci est particulièrement vrai pour les régions à climat tropical (divers pays en Afrique de l'Ouest, en Asie du Sud-Est, etc.) ou méditerranéen (Grèce, pays du Maghreb, Californie, etc.). En France, les premières populations virulentes de *M. arenaria* et *M. incognita* ont été signalées au début des années 1980 dans le Sud-Est (Hendy *et al.*, 1983), et depuis le nombre de cas répertoriés ne cesse de croître.

## 3 - Les recherches en cours

Clairement, les diverses contraintes mentionnées précédemment, et tout particulièrement le risque de contournement par des populations virulentes, peuvent conduire à la perte partielle ou totale de l'efficacité d'un gène de résistance. Combiné à la relative rareté des gènes de résistance disponibles, se pose alors le problème de la durabilité de la stratégie de lutte par résistance variétale contre les nématodes à galles en cultures maraîchères. Dans ce contexte, l'équipe « Interactions Plantes-Nématodes » du Centre INRA PACA à Sophia Antipolis, en collaboration avec divers partenaires (chercheurs, organisations professionnelles, agriculteurs, sélectionneurs privés), a mis en place un programme de recherche visant à mieux comprendre les déterminants génétiques de la résistance des Solanées aux nématodes à galles, au travers d'investigations conduites à la fois chez la plante et chez le parasite. Les sorties opérationnelles de ces recherches permettront : 1) d'orienter les sélectionneurs vers la création de nouveaux porte-greffes ou cultivars résistants à long terme ; et 2) de conseiller les producteurs pour une gestion optimale de leur utilisation dans le temps et l'espace, afin de limiter les risques de contournement des résistances, et donc de préserver leur durabilité.

### 3.1 - Appréhender les effets des gènes de résistance sur la capacité de contournement par les nématodes

Des études histologiques ont permis d'élucider en partie les mécanismes d'action des gènes de résistance au niveau cellulaire. Ces travaux ont montré que les nécroses d'hypersensibilité se produisent suite à l'attaque par les nématodes suivant une cinétique variable selon les gènes de

résistance concernés. Dans certains cas, la nécrose est précoce et localisée au niveau des tissus externes de la racine ; c'est ce qu'on observe notamment avec le gène *Mi-1* de la tomate ou le gène *Me3* du piment. Dans d'autres situations, la nécrose est plus tardive, et se développe après l'initiation d'un site nourricier imparfait par le nématode au niveau du cylindre central de la racine (cas du gène *Me1* du piment ; Bleve-Zacheo *et al.*, 1998 ; Pegard *et al.* 2005). Ces observations sont importantes car, de manière intéressante, une corrélation stricte existe entre le mode d'action du gène et la capacité de contournement par *M. incognita*, puisque seuls les gènes induisant une réaction rapide ont été contournés à ce jour.

Comme il a été mentionné plus haut, certains gènes de résistance peuvent être contournés par des populations virulentes du parasite. L'étude détaillée des interactions entre populations de nématodes et plantes résistantes a permis de mettre en évidence la spécificité du caractère de virulence : en effet, une population virulente vis-à-vis d'un gène de résistance donné ne peut pas se développer sur une plante porteuse d'un autre gène de résistance, qu'elle appartienne à la même espèce végétale ou non. C'est par exemple ce que l'on observe avec la tomate et le piment : les nématodes virulents vis-à-vis du gène *Me3* du piment sont incapables d'infester des piments porteurs du gène *Me1*, ou bien des tomates porteuses du gène *Mi-1* (Castagnone-Sereno *et al.*, 2001). A ce jour, il n'a pas été possible de sélectionner, en conditions artificielles ou naturelles, des nématodes cumulant des virulences vis-à-vis de plusieurs gènes de résistance.

L'analyse des traits d'histoire de vie des nématodes (fécondité et fertilité des femelles, pourcentage d'éclosion des œufs, etc.) lorsqu'ils sont inoculés à des génotypes sensibles ou résistants a montré qu'il existe un coût en terme de fitness associé à la virulence : en effet, au sein d'une population, les individus virulents vis-à-vis d'un gène de résistance donné se multiplient de manière moins efficace sur une plante sensible que les individus de la même population qui n'ont pas été sélectionnés pour ce caractère (Castagnone-Sereno *et al.*, 2007 ; Djian-Caporalino *et al.*, soumis). Cette baisse de fitness associée à la virulence constitue un « trade-off » ou « compromis évolutif », et pourrait avoir des conséquences importantes en terme de gestion, puisque les nématodes virulents pourraient être ainsi contre-sélectionnés sur des plantes sensibles. Dans cette hypothèse, une stratégie basée sur l'alternance de génotypes sensibles et résistants conduirait à retarder la sélection des pathotypes virulents, et donc à préserver la durabilité de la résistance.

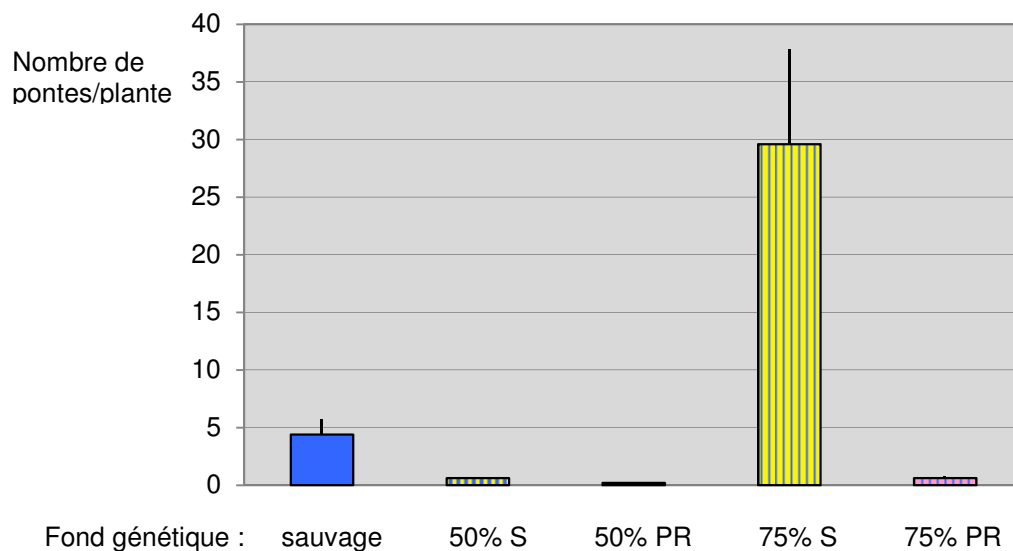
### 3.2 - Evaluer l'impact du contexte génétique sur l'expression de la résistance

La majorité des cultivars résistants aux nématodes utilisés actuellement sont porteurs de résistances monogéniques à effet majeur (résistance qualitative), qui peuvent être contournées par le parasite ciblé et devenir alors inefficaces. De plus, l'efficacité des gènes de résistance est souvent dépendante du contexte génétique dans lequel ils se trouvent. Sur le modèle Solanées/nématodes à galles, nous avons entrepris des recherches afin de déterminer les conditions génétiques dans lesquelles la durabilité de la résistance est préservée.

L'influence de l'état allélique du gène de résistance a été évaluée en confrontant des tomates résistantes homozygotes ou hétérozygotes pour le gène *Mi-1.2* à diverses populations avirulentes ou virulentes de *M. incognita*. Dans la plupart des situations, la reproduction des nématodes a été plus importante sur les tomates porteuses du gène *Mi-1.2* à l'état homozygote, ce qui suggère un effet de « dosage d'allèles » pour ce gène (Jacquet *et al.*, 2005).

Pour préserver un gène majeur du contournement, une des solutions les plus prometteuses est de l'associer à un fond génétique partiellement résistant (= QTL (Quantitative Trait Loci) de résistance à effet partiel). Dans le cas de la tomate, l'influence du fond génétique s'est révélée particulièrement importante lorsque le gène *Mi-1.2* est présent à l'état hétérozygote (Jacquet *et al.*, 2005). Chez le piment, des études similaires en cours concernent le gène *Me3*. Des descendance hybrides F1 et des

rétrocroisements entre la lignée HD149 porteuse du gène *Me3* et une variété sensible « Doux long des Landes » ou partiellement résistante « Yolo Wonder » ont été inoculés en conditions contrôlées avec une population avirulente de *M. incognita*. Après deux mois de test, un effet protecteur du fond génétique partiellement résistant a été détecté, et celui-ci est d'autant plus important que le pourcentage de ce fond génétique dans le génotype est important (Figure 2). Ces résultats confirment l'intérêt d'associer résistance majeure (qualitative) et résistance partielle (quantitative) dans un même cultivar afin de préserver l'efficacité du gène majeur, comme cela a déjà été mis en évidence dans le cas de gènes conférant la résistance aux virus phytopathogènes (Palloix *et al.*, 2009).

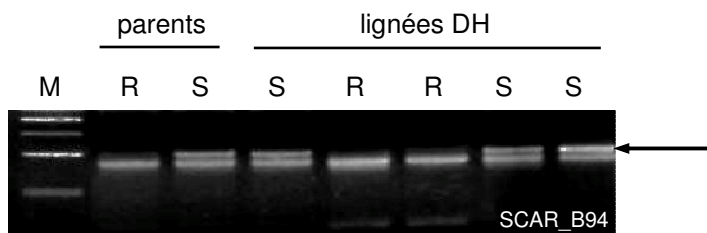


**Figure 2 :** Influence du fond génétique (cultivé) sur l'expression du gène *Me3* de résistance aux nématodes à galles chez le piment. S = sensible, PR = partiellement résistant.

En considérant les risques avérés de contournement des résistances monogéniques, une stratégie alternative consiste à cumuler plusieurs gènes de résistance dans un même cultivar. On parle alors de « pyramidage » de gènes de résistance. Des expérimentations sont en cours afin de tester l'efficacité d'une telle approche pour empêcher l'émergence de populations de nématodes virulentes. Pour cela, des croisements ont été mis en place pour générer des lignées de piment porteuses simultanément des gènes *Me1* et *Me3*, qui diffèrent par la nature du mécanisme histologique de résistance (voir plus haut). Ce matériel végétal a ensuite été comparé dans des tests pathologiques à divers génotypes ne possédant qu'un seul des deux gènes. Les résultats (encore préliminaires) de cette étude montrent clairement que les lignées pyramidées se comportent significativement mieux vis-à-vis des nématodes en terme de résistance à des populations avirulentes, mais également virulentes vis-à-vis de *Me3*. D'autre part, l'apparition de nématodes contournant à la fois les deux gènes de résistance n'a pas été observée. S'ils demandent à être confirmés, ces résultats sont néanmoins très prometteurs quant à l'intérêt du pyramidage pour limiter voire supprimer la sélection de nématodes virulents.

Afin de vérifier le résultat des croisements et suivre les disjonctions dans les descendances, une étape préalable importante a consisté à développer des marqueurs moléculaires fortement liés aux gènes de résistance. Un exemple de ce type de marqueur est illustré dans la Figure 3. Après validation, le transfert de ces marqueurs auprès des sélectionneurs leur permettra de pratiquer une sélection assistée par marqueurs au lieu d'un criblage par tests pathologiques au cours des premières étapes du processus de sélection, ce qui conduira à raccourcir le temps de développement de nouvelles variétés.



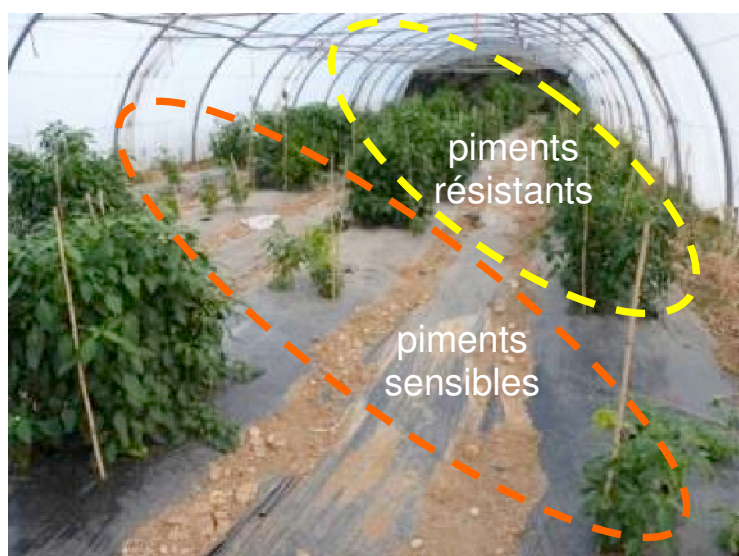


**Figure 3 :** Identification de génotypes de piment sensibles (S) ou résistants (R) aux nématodes à galles à l'aide du marqueur moléculaire SCAR\_B94 lié au gène Me3. Les plantes sensibles (dépourvues du gène de résistance) montrent après amplification une bande supplémentaire de 200 nucléotides (flèche) (Djian-Caporalino *et al.*, 2007).

### 3.3 - Gérer les cultivars résistants au champ

La plupart des résultats obtenus jusqu'ici l'ont été dans des conditions expérimentales de laboratoire, en apportant des inoculum contrôlés à des plantes cultivées en serre ou en pièces climatisées. L'étape ultime de validation de ces résultats est maintenant en cours, et va consister en une évaluation du déploiement des génotypes résistants en conditions de production, dans des rotations traditionnellement mises en place dans les exploitations maraîchères. Dans le cadre de plusieurs projets de recherche, des essais sont en cours dans des abris froids dont les sols sont naturellement infestés par les nématodes à galles (Figure 4), en collaboration avec des organisations professionnelles (Chambre d'Agriculture, etc.) ou directement chez des agriculteurs. A titre d'exemple, le piment a été choisi comme plante résistante à introduire dans la rotation. Les piments sont implantés en culture d'été, alors que des salades ou des blettes (deux plantes sensibles) sont cultivées en hiver. Les objectifs de ces essais sont multiples :

- évaluer le comportement de divers génotypes résistants (homozygotes ou hétérozygotes, associant gène majeur et fond génétique partiellement résistant ou non, cumulant plusieurs gènes de résistance ou non) en conditions naturelles d'infestation et selon des procédés de conduite culturale conventionnels ;
- estimer le risque de contournement de la résistance au champ ;
- quantifier le potentiel d'assainissement du sol par les génotypes résistants en fonction du nombre de cycles de culture.



**Figure 4 :** Expérimentation sous abri froid. Des piments sensibles (variété « Doux long des Landes ») et résistants (lignée HD330 porteuse du gène Me1) ont été mis en place dans un tunnel fortement infesté par *Meloidogyne incognita* après une culture de salades sensibles. Trois mois après le repiquage, des différences très importantes de croissance sont observées entre les deux génotypes (photo INRA).

## Conclusion

La prise en compte de manière systématique de la résistance aux nématodes en tant que critère d'amélioration variétale des espèces maraîchères par les sélectionneurs est un phénomène relativement nouveau, en lien direct avec l'émergence de problèmes nématologiques sérieux en culture suite à l'abandon de l'utilisation de nématicides chimiques. Dans le même temps, le contournement de plus en plus fréquent du gène majeur *Mi-1.2* de la tomate, déployé à l'échelle mondiale depuis plus de 50 ans et utilisé sans discernement, a conduit à la mise en place de programmes de recherche visant à proposer de nouvelles stratégies pour améliorer la durabilité de la résistance. Au vu des premiers résultats, les pistes les plus prometteuses visent à cumuler des résistances majeures et quantitatives dans un même cultivar, et à raisonner l'utilisation de ces cultivars au champ, en évitant toute monoculture systématique.

Cependant, sélectionner et utiliser de nouvelles variétés dans un objectif de résistance durable ne pourra se faire sans l'acquisition de connaissances scientifiques visant à une meilleure compréhension du fonctionnement du pathosystème à différents niveaux : déterminisme génétique des résistances, diversité génétique et pouvoir pathogène des nématodes, déterminants moléculaires de la spécificité des interactions, influence des pressions de sélection exercées par les résistances sur les populations parasites, etc. Au final, ces informations devront s'intégrer avec les données socio-économiques issues des filières professionnelles pour conduire à des solutions optimales, en terme de durabilité, de déploiement dans le temps et l'espace des génotypes résistants.

## Remerciements

Ces recherches ont été effectuées en collaboration avec divers partenaires : les collègues de l'Unité de Génétique et Amélioration des Fruits et Légumes de l'INRA à Montfavet et de l'Istituto per la Protezione delle Piante à Bari (Italie), des sélectionneurs privés (Clause-Tézier, Syngenta, Vilmorin), la Chambre d'Agriculture 06. Elles ont bénéficié du soutien financier du Ministère de l'Agriculture (Convention N° C06/03), de l'ANR (projet SYSBIOTEL) et de la Communauté Européenne (REX-ENDURE).

## Références bibliographiques

- Bleve-Zacheo T., Bongiovanni M., Melillo M.T., Castagnone-Sereno P., 1998. The pepper resistance genes *Me1* and *Me3* induce differential penetration rates and temporal sequences of root cell ultrastructural changes upon nematode infection. *Plant Science* 133, 79-90.
- Castagnone-Sereno P., 2002. Genetic variability of nematodes: a threat to the durability of plant resistance genes? *Euphytica* 124, 193-199.
- Castagnone-Sereno P., Bongiovanni M., Djian-Caporalino C., 2001. New data on the specificity of the root-knot nematode resistance genes *Me1* and *Me3* in pepper. *Plant Breeding* 120, 429-433.
- Castagnone-Sereno P., Bongiovanni M., Wajnberg E., 2007. Selection and parasite evolution: a reproductive fitness cost associated with virulence in the parthenogenetic nematode *Meloidogyne incognita*. *Evolutionary Ecology* 21, 259-270.
- Djian-Caporalino C., 2010. Nématodes à galles, des ravageurs de plus en plus préoccupants. *PHYTOMA La Défense des Végétaux* 638, 43-49.
- Djian-Caporalino C., Fazari A., Arguel M.J., Vernie T., VandeCastele C., Faure I., Brunoud G., Pijarowski L., Palloix A., Lefebvre V., Abad P., 2007. Root-knot nematode (*Meloidogyne* spp.) *Me* resistance genes in pepper (*Capsicum annuum* L.) are clustered on the P9 chromosome. *Theoretical and Applied Genetics* 114, 473-486.
- Djian-Caporalino C., Pijarowski L., Januel A., Lefebvre V., Phally T., Palloix A., Dalmasso A., Abad P., 1999. Spectrum of resistance to root knot nematodes (*Meloidogyne* spp.) in sweet pepper (*Capsicum annuum* L.) and inheritance of heat-stable resistance in the PM687 line derived from PI322719. *Theoretical and Applied Genetics* 99, 496-502.

Djian-Caporalino C., Védie H., Arrufat A., 2009. Nématodes à galles, l'atout des plantes-pièges. PHYTOMA La Défense des Végétaux 624-625, 21-25.

European and Mediterranean Plant Protection Organization, 2010. A2 List of pests recommended for regulation as quarantine pests (version 2010-09).

Hendy H., Pochard E., Dalmaso A., 1983. Transmission héréditaire de la résistance aux nématodes *Meloidogyne* Chitwood (Tylenchida) portée par deux lignées de *Capsicum annuum* L. : étude de descendance homozygotes issues d'androgénèse. Agronomie 5, 93-100.

Jacquet M., Bongiovanni M., Martinez M., Verschave P., Wajnberg E., Castagnone-Sereno P., 2005. Variation in resistance to the root-knot nematode *Meloidogyne incognita* in tomato genotypes bearing the *Mi* gene. Plant Pathology 54, 93-99.

Palloix A., Ayme V., Moury B., 2009. Durability of plant major resistance genes to pathogens dependson the genetic background, experimental evidence and consequences for breeding strategies. New Phytologist 183, 190-199.

Pegard A., Brizzard G., Fazari A., Soucaze O., Abad P., Djian-Caporalino C., 2005. Histological characterization of resistance to different root-knot nematode species related to phenolics accumulation in *Capsicum annuum* L. Phytopathology 95, 158-165.

Williamson V.M., Roberts P.A., 2009. Mechanisms and genetics of resistance. In: Perry R.N., Moens M., Starr J.L. (eds.), Root-Knot Nematodes, CAB International, Wallingford, UK, pp 301-325.