

## La lutte contre les nématodes à kyste de la pomme de terre *Globodera rostochiensis* et *Globodera pallida*

Laura Chauvin<sup>1</sup>  
Bernard Caromel<sup>3</sup>  
Marie-Claire Kerlan<sup>1</sup>  
Elsa Rulliat<sup>2</sup>  
Sylvain Fournet<sup>2</sup>  
Jean-Éric Chauvin<sup>1</sup>  
Eric Grenier<sup>2</sup>  
Daniel Ellissèche<sup>1</sup>  
Didier Mugniéry<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Unité mixte de recherche (UMR) 118,  
« Amélioration des plantes et biotechnologies végétales » (APBV),  
Institut national de la recherche agronomique (Inra),  
Agrocampus de Rennes,  
Kéraiber,  
29260 Ploudaniel  
France  
<Laura.C Chauvin@rennes.inra.fr>  
<kerlan@lerheu.rennes.inra.fr>  
<ellissec@lerheu.rennes.inra.fr>

<sup>2</sup> Unité mixte de recherche (UMR) 1099  
« Biologie des organismes et des populations appliquée à la protection des plantes » (BiO3P),  
Institut national de la recherche agronomique (Inra),  
Agrocampus Ouest,  
Domaine de la Motte au Vicomte,  
BP 35327,  
35653 Le Rheu,  
France  
<Sylvain.Fournet@rennes.inra.fr>  
<eric.grenier@rennes.inra.fr>  
<didier.mugniery@rennes.inra.fr>  
<elisa.rulliat@rennes.inra.fr>

<sup>3</sup> Génétique et amélioration des fruits et légumes (GAFL), Unité de recherche (UR) 1052,  
Institut national de la recherche agronomique (Inra),  
Domaine Saint Maurice,  
BP 94,  
84143 Montfavet cedex  
France  
<Bernard.Caromel@avignon.inra.fr>

### Résumé

Inscrits parmi les parasites de quarantaine, les nématodes à kyste, *Globodera rostochiensis* et *Globodera pallida* sont présents dans de nombreux bassins de production de pomme de terre où les dégâts sont parfois considérables. La lutte contre ces ravageurs est préventive dans les zones de culture indemnes, condition indispensable à la production de plant de pomme de terre. Des pratiques agronomiques adéquates et l'utilisation de variétés résistantes conduisent à la réduction du taux d'infestation des terrains contaminés. Dans certaines situations géographiques, le traitement du sol par solarisation peut remplacer efficacement l'emploi de nématicides destinés à être interdits. La résistance génétique représente le moyen de lutte le plus efficace. L'introgession de nouvelles formes de résistance a été entreprise à partir d'autres espèces tubéreuses, notamment *Solanum vernei*. La récente caractérisation moléculaire de nouveaux facteurs génétiques de la résistance chez les espèces *Solanum spgazzinii* et *Solanum sparsipilum* et l'étude de leur association devraient faire progresser le travail de sélection variétale. La combinaison des différents moyens de lutte présentés en fonction des situations devrait aboutir à la mise en pratique d'une véritable lutte intégrée en culture de pomme de terre de consommation.

**Mots clés :** amélioration des plantes ; lutte intégrée ; nématode des plantes ; quarantaine ; *Solanum tuberosum*.

**Thèmes :** pathologie ; productions végétales.

### Abstract

#### Control of potato cyst nematodes *Globodera rostochiensis* and *Globodera pallida*

The potato cyst nematodes *Globodera rostochiensis* and *Globodera pallida* are quarantine pests. Present worldwide, they cause serious damage to potato crops. Seed production is only authorized in non-infested soils and preventive measures are taken. In infested areas, the use of appropriate agronomical practices and the choice of resistant genotypes aim at restricting or preventing nematode multiplication. Where the climatic conditions allow the solarisation of the soil, this method can efficiently replace chemical treatments that are eventually bound to be banned. Genetic resistance is more effective and widely exploitable. Genetic resistance components have been introgressed into a cultivated potato variety from wild tuberous species (*Solanum vernei*). Recent identification, molecular characterisation and studies of different resistance factors in *Solanum spgazzinii* and *Solanum sparsipilum* species bring new opportunities in breeding programmes. The approaches could be combined to elaborate an integrated control adapted to different situations for cropping ware and potato consumption.

**Keywords:** integrated control; plant breeding; plant nematodes; quarantine; *Solanum tuberosum*.

**Subjects:** pathology; vegetal productions.

Tirés à part : L. Chauvin

Les nématodes à kyste, *Globodera rostochiensis* et *Globodera pallida*, ravageurs dommageables à la pomme de terre, provoquent sur cette culture des dégâts tels qu'ils justifient leur classification en parasites de quarantaine et l'adoption de mesures de lutte obligatoires appliquées à l'échelle internationale. Ces moyens de lutte qui visent tous l'éradication de ces parasites sont : la prévention par application des textes réglementaires et par utilisation de plants sains, des désinfections de sol, des pratiques agronomiques efficaces et l'utilisation de variétés résistantes. La combinaison de ces différents moyens en fonction des situations devrait aboutir à la mise en pratique d'une véritable lutte intégrée en culture de pomme de terre de consommation.

*G. rostochiensis* a été, pendant longtemps, le principal nématode ravageur de la pomme de terre des zones tempérées ou froides. L'identification du gène de résistance dominant *H1* dérivé de l'espèce *Solanum tuberosum ssp. andigena* (Ellenby, 1954), actif contre *G. rostochiensis* mais pas contre *G. pallida*, a permis d'introduire ce caractère de résistance dans un grand nombre de variétés cultivées. La culture de ces variétés a opéré une pression de sélection sur le terrain en faveur, d'une part de pathotypes virulents de *G. rostochiensis*, d'autre part du remplacement de cette espèce par *G. pallida*.

Après un rappel sur leur biologie, ce texte se propose de dresser un état des lieux des résultats acquis dans la lutte contre les nématodes à kyste et d'en discuter les limites et les progrès possibles.

## Biologie des nématodes appartenant au genre *Globodera*

Originaires des Andes (Evans et Stone, 1977), ces nématodes ont été introduits en Europe au XIX<sup>e</sup> siècle, vraisemblablement avec des tubercules destinés à l'amélioration de la résistance au mildiou (Evans et Trudgill, 1992). Leur dissémination à travers le monde a suivi la diffusion de la culture de la pomme de terre et leur présence est signalée actuellement sur tous les continents.

Ces deux espèces, assez proches pour avoir été confondues jusqu'en 1972 (Stone, 1972), sont des parasites spécifiques des Solanacées et de la pomme de terre en particulier. La couleur des femelles à maturité les différencie et désigne leur nom commun : « Nématode doré de la pomme de terre » pour *G. rostochiensis* et « Nématode blanc de la pomme de terre » pour *G. pallida* (figure 1).

Leurs biologies sont identiques. Parasites obligatoires, ils vivent aux dépens des tissus qu'ils colonisent. La pomme de terre est leur principale plante hôte : ses exsudats radiculaires ont la capacité de faire éclore massivement les œufs contenus dans les kystes présents dans le sol et de libérer ainsi les formes juvéniles de deuxième stade (J2) qui, grâce à un stylet perforant, envahissent les racines, les stolons ou les tubercules (figure 2). La pénétration dans les tissus est suivie de l'induction d'un site nourricier, le syncytium, constitué par la modification d'une cellule végétale au service du parasite. Ce syncytium reste fonctionnel tout au long du développement du nématode qui, après trois mues (stades J3 et J4), devient un adulte sexué, mâle ou femelle. Son rôle est également essentiel dans la détermination du sexe : des conditions nutri-

tionnelles favorables conduisent au développement de femelles ; *a contrario*, des facteurs défavorables induisent la formation de mâles. Les œufs se développent à l'intérieur de la femelle fécondée, dont la cuticule se transforme en une enveloppe de protection : le kyste. Jusqu'à un millier d'œufs, contenant chacun un juvénile, peuvent se trouver à l'intérieur d'un kyste. À maturité, le kyste se détache de la racine et il constitue un excellent organe de dissémination et de conservation dans lequel les juvéniles peuvent, en zones tempérées, rester viables pendant 10 à 20 ans.

Normalement, il ne se produit qu'une seule génération par an, car les juvéniles néoformés entrent en diapause, un état de repos qui ne sera levé que par l'effet de températures hivernales. Cette diapause est généralement plus forte chez *G. rostochiensis* que chez *G. pallida*. Néanmoins, il a été constaté, en France, dans des situations géographiques favorables à la culture précoce de la pomme de terre, que quelques populations de *G. pallida* peuvent présenter une diapause très peu prononcée et un deuxième cycle peut s'initier en automne sur les repousses de pomme de terre.



Figure 1. Femelles à maturité sur racines de pomme de terre.

Figure 1. Potato roots carrying females of *G. rostochiensis* and *Globodera pallida*. A) *Globodera rostochiensis* ; B) *Globodera pallida*.

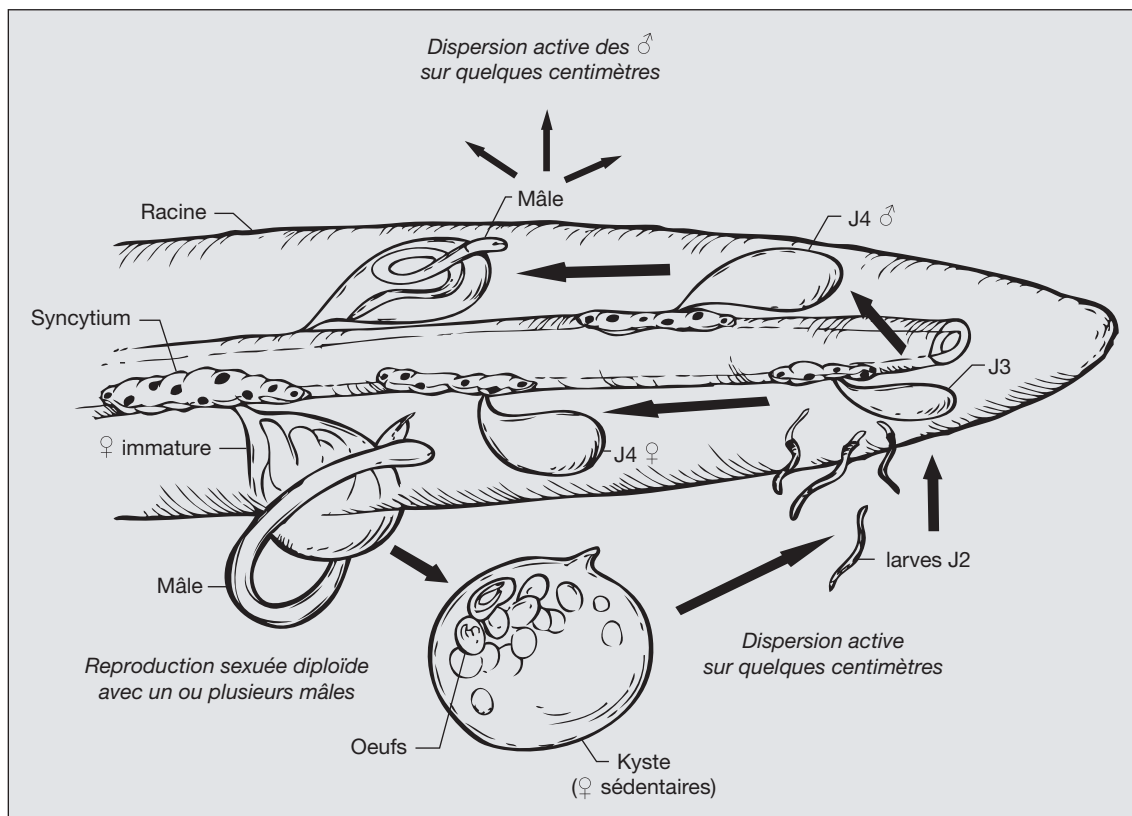


Figure 2. Schéma du cycle du nématode de *Globodera rostochiensis* et de *Globodera pallida* (Pauline Caster-Picard).

Figure 2. Potato cyst nematode cycle scheme.

Les lésions causées au système racinaire ne sont pas très visibles, contrairement aux « piqures » sur tubercules qui peuvent rendre le produit non commercialisable (figure 3). L'ampleur des dégâts, la diminution des rendements, l'altération de la peau des tubercules sont d'autant plus importantes que le nombre de nématodes présents dans le sol est élevé (figure 4). D'autres facteurs concourent à l'aggravation des pertes : la sensibilité variétale, les carences hydriques ou minérales, la compétition avec des mauvaises herbes, la présence d'autres parasites (*Verticillium*, *Rhizoctonia*).

## Méthodes de lutte

En zone de production de plants, la découverte d'un seul kyste dans une parcelle conduit à l'interdiction de la culture de pomme de terre pendant au minimum cinq ans. Réglementée par des normes législatives, cette méthode de lutte essen-

tiellement passive est basée sur le constat qu'une réduction annuelle des populations se produit naturellement, suite à des éclosions en absence d'hôte et par l'effet des facteurs biotiques et abiotiques défavorables à la survie du parasite. Son efficacité peut être contrariée par la présence de repousses de pommes de terre. Elle a comme inconvénient d'être lente car la décontamination est progressive, et de laisser, pendant plusieurs années, un foyer de contamination dans une zone sensible avec tous les risques de dispersion par l'eau, le vent et les instruments agricoles.

La décontamination peut être fortement accélérée par les cultures pièges de pomme de terre. Une procédure a été mise au point et testée avec succès. Elle consiste à réaliser une plantation à haute densité de petits tubercules, fortement prégermés. Cinq semaines plus tard, la culture est détruite, soit chimiquement, soit mécaniquement. Dans ces conditions, il n'y a pas de formation de tubercules fils ni, par conséquent, de repousse estivale.

Après destruction de la culture, les diminutions de populations mesurées sont de l'ordre de 70 à 80 %, ce qui correspond aux pourcentages d'éclosion des kystes sous l'influence des exsudats radicaux observés pendant une culture de pomme de terre. Cette diminution des populations est largement supérieure à celle attendue, de l'ordre de 25 % en climat océanique, consécutive à une simple absence de pomme de terre. Les risques de dissémination sont donc fortement diminués (Mugniéry et Balandras, 1984).

En culture de pomme de terre de consommation, on peut tenter, seules ou associées, diverses méthodes de lutte, destinées à amoindrir les dommages du parasite :

- la première est l'utilisation de plants certifiés, donc indemnes de nématodes ;
- une rotation culturale, au minimum de quatre ans, permet de maintenir ou de réduire la population de nématodes à condition que le contrôle des repousses de pomme de terre soit très bien maîtrisé ;
- dans des conditions climatiques favorables à la culture précoce de la pomme de

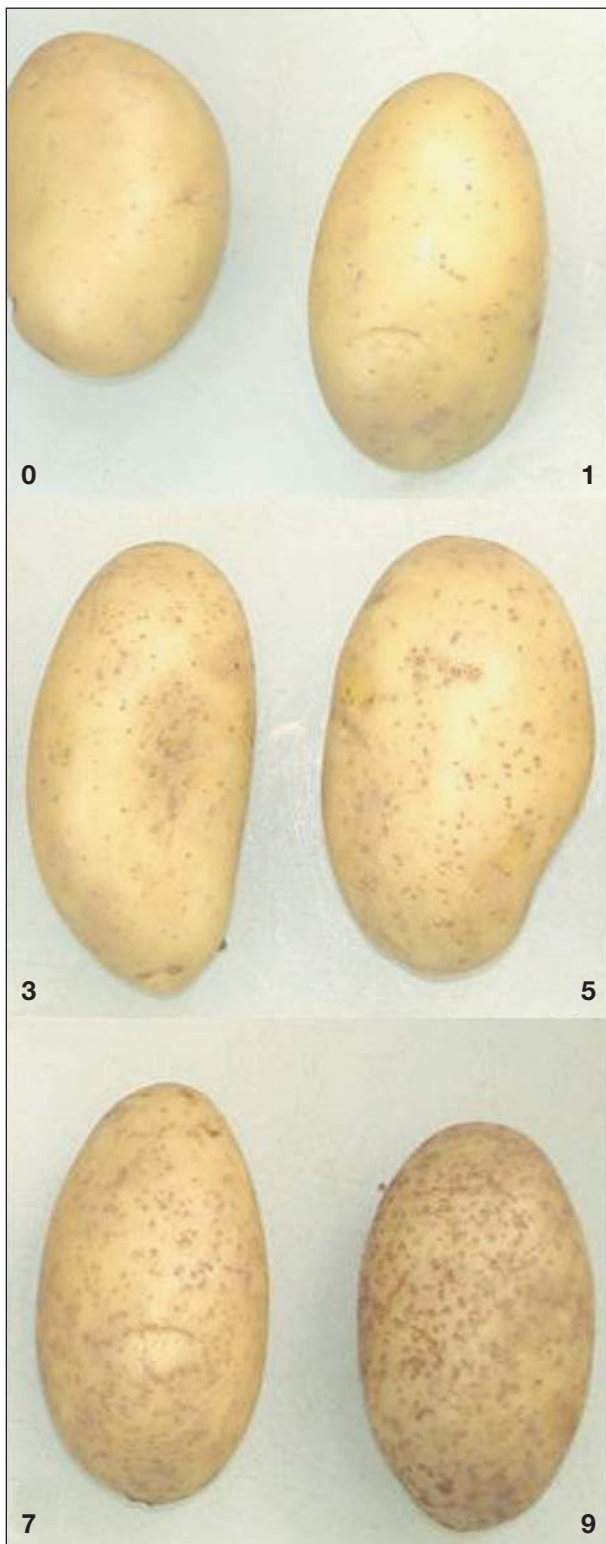


Figure 3. Dégâts notés de 0 à 9 dus aux piqûres de *Globodera pallida* sur tubercules.

Figure 3. Damages induced by *Globodera pallida* stings on tubers, rated 0 through 9.

terre, on peut jouer sur le différentiel entre la vitesse de tubérisation et la vitesse de développement des némato-

des. Pour ce faire, il faut évidemment choisir des variétés précoces et les récolter tôt. Pour des raisons économiques,

cette méthode n'est pas généralisable à tout un bassin de production ;  
 – cultures pièges de contre saison : la plantation, en septembre, d'une culture de pomme de terre destinée à être détruite trois semaines plus tard engendre à l'Île de Ré une réduction des populations de 90 %. La même pratique à Noirmoutier ne réduit les populations que de 50 %. Cet écart est dû aux différences de diapause entre populations et, probablement, aux différences de température enregistrées pendant l'été ;  
 – traitement du sol : si le traitement de sol par des nématicides de contact est destiné à être interdit à cause de la nocivité des matières actives pour l'homme et pour l'environnement, la solarisation présente une alternative intéressante. C'est un processus qui utilise la radiation solaire capturée sous film plastique pour chauffer le sol en profondeur. Son efficacité dépend du climat : très efficace dans le sud de la France, elle est illusoire en Écosse ;  
 – variétés résistantes : c'est l'alternative la plus intéressante et la moins onéreuse.

## Amélioration de la résistance génétique de la pomme de terre

La résistance génétique s'exprime comme l'aptitude d'un génotype à s'opposer au développement des nématodes. La culture d'un tel génotype conduit donc à faire éclore les juvéniles présents dans le sol, puis à les piéger dans ses racines, en empêchant leur développement ou leur multiplication par le développement massif de mâles (phénomène de masculinisation). Après culture, le sol se retrouve donc assaini dans une proportion équivalente à celle de l'éclosion des kystes, soit généralement de 80 %. Comparée à un traitement nématicide, son efficacité est équivalente, voire supérieure et elle n'en comporte pas les inconvénients environnementaux.

La variabilité génétique des pommes de terre cultivées en Europe, au moment de l'introduction des nématodes à kyste, était relativement étroite et le matériel cultivé ne comportait pas de gènes de résistance capables d'en contrer la multiplication.

Différentes espèces, souvent diploïdes ( $2n = 2x = 24$  chromosomes), apparen-

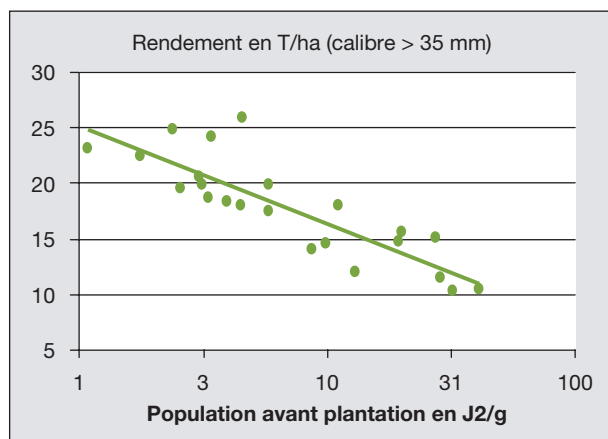


Figure 4. Effet du niveau d'infestation de *Globodera pallida* sur le rendement de la variété Alcmaria (île de Ré, 2006).

Figure 4. Impact of the soil infestation level of *Globodera pallida* on the potato yield of cv Alcmaria (île de Ré, 2006).

tées à la pomme de terre cultivée ( $2n = 4x = 48$  chromosomes) ont été identifiées comme sources possibles de résistance pour l'amélioration des variétés cultivées, et différentes formes de résistance ont été caractérisées.

La résistance monogénique, comme celle due aux gènes *H1* (*S. tuberosum* subsp. *andigena*) et *H2* (*Solanum multidissectum*) se traduit par une réaction rapide de nécrose accompagnée d'un dépôt de lignine autour du syncytium qui devient défavorable à la formation des femelles. Dans le cas du gène *H1*, il a été montré qu'il se produit une réaction gène pour gène : au gène de résistance de la plante correspond chez le nématode un gène de virulence récessif (Janssen *et al.*, 1991). Différents pathotypes ont pu être distingués selon leurs aptitudes à se développer ou non sur les gènes *H1* et *H2* (Tableau 1). La culture, plusieurs années de suite, de variétés possédant le type de résistance *H1* opère une pression de sélection sur les populations de nématodes, favorable au développement de pathotypes virulents capables de la contourner (Huijsman, 1961).

Rapportées par Phillips (1994), des résistances oligogéniques (*Solanum kurtzianum*) et polygéniques (*Solanum vernei*) ont été découvertes. Elles sont partielles et quantitatives.

Du fait que *G. pallida* a largement supplanté *G. rostochiensis* en France, et qu'aucune résistance de haut niveau vis-à-vis de cette espèce n'était présente dans le fonds génétique de *S. tuberosum*, l'Inra a initié des programmes d'introgession de résistance à *G. pallida* à partir des espèces apparentées (Rousselle-Bourgeois et Mugniéry, 1995).

Dans un premier temps, du matériel à résistance polygénique écossais, néerlandais et péruvien issu de *S. vernei* a été utilisé. Malgré la difficulté de suivre en sélection un caractère quantitatif, des individus combinant très haut niveau de résistance partielle à la population suisse « Chavornay » (considérée comme la population européenne la plus agressive) et bon degré d'adaptation aux conditions agroclimatiques françaises (rendement, qualité, etc.) ont été obtenus.

Depuis 1996, une dizaine de géniteurs de résistance à *G. pallida* ont été distribués

chaque année aux obtenteurs français, membres de l'association des créateurs de variétés nouvelles de pomme de terre. Ces géniteurs ont perdu des ancêtres sauvages les caractères ne correspondant pas à nos conditions de culture tels que la longueur importante du cycle végétatif, le manque de repos végétatif ou la longueur excessive des stolons, et ont une bonne aptitude à transmettre un niveau élevé de la résistance à leur descendance.

Dans un second temps, les recherches entreprises sur le germoplasme ont permis de détecter des résistances chez deux espèces diploïdes sauvages, *S. spagazzinii* et *S. sparsipilum* chez lesquelles de nouveaux facteurs de résistances ont été identifiés. Les objectifs actuels sont :

- d'enrichir la base génétique d'où seront issues les variétés de demain ;
- de faciliter la sélection de ces résistances par l'utilisation de marqueurs moléculaires (sélection assistée par marqueurs).

Un travail de cartographie de ces deux espèces sauvages a donc été entrepris.

Le déterminisme génétique de la résistance de *S. spagazzinii* et de *S. sparsipilum* à *G. pallida* a été étudié au niveau diploïde. Une analyse QTL (*quantitative trait loci*) a permis de disséquer la résistance globale en facteurs génétiques et de les localiser sur le génome de chaque parent. Sept QTL de résistance ont été ainsi trouvés : deux QTL sur les chromosomes 5 et 11 de *S. sparsipilum*, trois QTL sur les chromosomes 5, 6, et 12 de *S. spagazzinii* et deux QTL sur le chromosome 8 et sur le chromosome 11 de *S. tuberosum* (Caromel *et al.*, 2003, 2005).

Les deux QTL identifiés sur les chromosomes 5 de *S. sparsipilum* et *S. spagazzinii* montrent un effet fort, les cinq autres QTL montrant un effet moindre.

Une analyse plus fine des modes d'action des QTL de résistance sur le développement de *G. pallida* a montré que la résistance conférée par chaque QTL majeur provoque un déséquilibre du sex-ratio en faveur des mâles. Quand les deux QTL originaires de *S. sparsipilum* sont présents ensemble dans un même clone, ils présentent la particularité d'induire une nécrose autour des nématodes et un arrêt du développement de la majorité d'entre eux, les autres ne formant que des mâles. De plus, si chacun des QTL majeurs confère un niveau de résistance différent selon la population de *G. pallida* étudiée, l'addition, que ce soit pour *S. spagazzinii* ou pour *S. sparsipilum*, des QTL majeurs

Tableau 1. Développement de pathotypes (+) ou non (-) en présence des gènes de résistance *H1* et *H2*.

Table 1. Potato cyst nematode pathotype scheme showing the development (+) or not (-) with resistance genes *H1* and *H2*.

	<i>Globodera rostochiensis</i>		<i>Globodera pallida</i>	
	Ro1/4	Ro2/3/5	Pa1	Pa2/3
<i>H1</i>	-	+	+	+
<i>H2</i>	+	+	-	+

et des QTL mineurs élimine tout effet « population-spécifique » (Caromel *et al.*, 2005).

Actuellement, ce sont les QTL situés sur le chromosome 5 de *S. sparsipilum* et de *S. spagazzinii* qui ont été localisés avec le plus de précision par des marqueurs moléculaires. L'identification de marqueurs moléculaires à proximité des QTL à effet faible est en cours.

## Durabilité des résistances génétiques

La durabilité de la résistance dépend de nombreux facteurs.

### Résistances monogéniques et oligogéniques

La résistance conférée par le gène *H1* a été introgressée dans de très nombreuses variétés de pomme de terre et celles-ci ont été cultivées sur de grandes surfaces pendant de nombreuses années. Deux cas ont été mis en évidence :

– le premier est celui d'une perte de résistance relativement rapide. Aux Pays-Bas, six à huit ans de cultures ininterrompues de telles variétés ont conduit à sélectionner le pathotype virulent Ro2/3/5 de telle manière que la population initiale constituée de Ro1/4 a été complètement remplacée par ce nouveau pathotype. À l'inverse, les services officiels britanniques ont été incapables de constater un tel contournement, en dépit du succès de la variété résistante Maris Piper, cultivée sur des milliers d'hectares pendant de nombreuses années ;

– le second cas est le remplacement d'une espèce par une autre : en France, en Grande-Bretagne et également aux Pays-Bas, l'utilisation du gène *H1* a conduit au remplacement de *G. rostochiensis* Ro1/4 par *G. pallida*.

À quoi peut-on attribuer de telles différences de durabilité ? Ces deux espèces de nématodes étant des espèces importées des Andes, il est probable que les individus introduits en Grande-Bretagne ne possédaient pas le gène de virulence correspondant au gène *H1*, alors que ceux introduits aux Pays-Bas le possédaient.

La résistance générée par *Solanum sparsipilum* contre *G. pallida* pourrait obéir

aux mêmes lois. En effet, les populations européennes de *G. pallida* proviennent du sud du Pérou. Sur huit populations européennes évaluées, aucune ne comporte d'individus virulents aux QTL de résistance de cette espèce alors que toutes les populations du nord du Pérou sont virulentes. Un échantillonnage beaucoup plus exhaustif doit être entrepris avant de tirer une conclusion définitive. Mais ces faits mettent en exergue l'importance à attribuer aux mesures de quarantaine pour éviter l'introduction de nématodes d'une espèce déjà présente en un lieu mais appartenant à des groupes de virulence différents.

### Résistance polygénique

Il est beaucoup trop tôt pour évaluer la durabilité de variétés à résistance polygénique, celles-ci n'ayant pas encore été cultivées, hormis quelques clones particuliers en essais de laboratoire. De ces essais, il est difficile de tirer des conclusions ayant une valeur générale. Les quelques données disponibles se réfèrent aux résistances issues de *S. vernei*. Certaines résistances sont contournées très rapidement, et ce, d'autant plus vite que le niveau de résistance est faible. Mais certains clones à forte résistance ont pu être contournés en six années de culture ininterrompues. Dans d'autres essais de même durée, d'autres clones ont gardé leur résistance (Mugniéry *et al.*, 2007).

Les génotypes résistants étant le résultat du croisement d'un géniteur résistant avec une variété sans résistance, le type de géniteur résistant et le type de variété non résistante influent fortement, d'une part, sur le niveau de résistance, d'autre part, sur sa durabilité. Certaines variétés non résistantes possèdent en effet des QTL de résistance qui ne s'expriment qu'en combinaisons particulières, imprévisibles actuellement. Là encore, seule l'expérience permettra d'y voir plus clair.

Enfin, le fait de sélectionner par cultures ininterrompues des nématodes qui deviennent de plus en plus agressifs n'implique pas que cette agressivité soit efficace contre d'autres systèmes de résistance. Turner et Fleming (2002) indiquent tous les cas de figures possibles : certains nématodes conservent leur agressivité après passage sur d'autres génotypes résistants, d'autres la perdent intégralement.

## Conclusion et perspectives

L'objectif d'éradication des nématodes du genre *Globodera* imposé par la quarantaine en zone de culture de plant de pomme de terre n'est pas irréaliste. Ces organismes, caractérisés par une très forte spécificité vis-à-vis de la pomme de terre par un taux de multiplication relativement important et des capacités de survie dans le sol exceptionnelles, n'accomplissent qu'un ou deux cycles par an et possèdent dans le sol une mobilité très réduite, alors qu'ils sont très fortement disséminés par le vent et l'eau à l'intérieur d'un bassin de production.

Ces caractéristiques justifient la pertinence et la mise en œuvre des différentes méthodes de lutte qui visent avant tout à sauvegarder les bassins de production indemnes et à contrarier l'accomplissement du cycle reproductif et/ou la survie des formes de résistance.

Le choix des méthodes de lutte et de leur combinaison dépend surtout du type de culture envisagé, des conditions climatiques, de la présence ou non de l'une ou l'autre des deux espèces considérées, et de leurs pathotypes.

L'amélioration génétique des résistances et le déploiement de ces résistances peuvent contribuer fortement à l'efficacité de la lutte contre ces parasites.

Actuellement, la plupart des variétés résistantes portent surtout la résistance monogénique due au gène *H1*. Si un bassin de production n'est infesté que par *G. rostochiensis*, de telles variétés assainissent le sol avec une efficacité de l'ordre de 80 %. Mais il faudra, d'une part, alterner ces variétés avec des variétés sans résistance pour éviter tout contournement par sélection du pathotype Ro2/3/5 qui contourne la résistance du gène *H1*, d'autre part veiller à ne pas introduire l'espèce *G. pallida*.

Le cas de *G. pallida* est plus compliqué dans la mesure où il n'existe que peu de variétés résistantes. De plus, elles sont tardives et donc inadaptées aux cultures de primeurs.

Certains hybrides de maturité plus précoce, potentiellement des futures variétés, à résistance polygénique issue de *S. vernei*, sont en cours d'évaluation. Même si leur haut niveau de résistance se confirme, le risque de contournement existe. Il faudra donc développer des modes d'emploi pour éviter l'adaptation

des populations de nématodes, en les alternant par exemple avec des variétés sans résistance en attendant que les futures variétés possédant les QTL de résistance issus des espèces sauvages (*S. sparsipilum* et *S. spegazzinii*) soient disponibles sur le marché.

L'introgession dans l'espèce cultivée de ces nouveaux facteurs génétiques de résistance est un travail long et laborieux. Chaque facteur de résistance a un poids et un effet différent dans l'expression du caractère, selon le contexte génétique dans lequel il vient se trouver lors du croisement. Certaines associations ont déjà été étudiées et deux mécanismes de résistance ont été mis en évidence et d'autres associations sont en voie d'obtention. La définition de marqueurs moléculaires associés à chaque QTL de résistance permettra de caractériser les combinaisons les plus favorables pour ensuite pouvoir les identifier et les maintenir lors de la sélection variétale.

Une fois terminé le travail d'identification des marqueurs moléculaires des facteurs de résistance qu'on voudra associer en

fonction de leur origine, leur mode d'action, leur complémentarité, leur synergie et leur efficacité, la sélection de génotypes associant les caractères recherchés selon différents objectifs de sélection et la résistance aux nématodes sera facilitée par l'utilisation de marqueurs, quand celle-ci aura été validée au niveau tétraploïde.

Cet article avait pour intention de présenter un travail de recherche partant d'études fondamentales (dynamique des populations de parasite, génétique de la résistance de la plante) pour aboutir à des résultats applicables dans la pratique agricole, fournissant ainsi un bon exemple de lutte intégrée (*encadré 1*). Le pathosystème étudié concerne de nombreuses régions dans le monde. En effet, la pomme de terre, quatrième production végétale mondiale, est cultivée ou cultivable là où règnent des températures relativement fraîches au moins pendant une partie de l'année ou même de la journée (différences de température jour/nuit), situation que l'on rencontre non seulement sous les latitudes tempérées mais aussi dans les zones tropicales d'altitude. ■

### Encadré 1

#### Exemple d'application de lutte intégrée dans le cas de *G. pallida*

Cet exemple est donné à titre indicatif et s'appuie sur les résultats d'une étude réalisée dans l'île de Ré. Ce bassin de production de pommes de terre de primeur se caractérise par la présence de *G. pallida* Pa2/3. Les dégâts occasionnés par ce nématode dans cette île sont graves qualitativement : le tubercule est « piqué » et peu commercialisable. Quantitativement, la production en tubercules peut diminuer de 50 %.

Il est cultivé essentiellement des variétés de type précoce (exemple : Alcmaria) et des variétés plus tardives (exemple : Charlotte). Les dommages dus aux nématodes commencent à être mesurables à partir de 1 J2/g de sol et les sols sont souvent contaminés à raison de 50 J2/g de sol. La population locale de nématodes de l'île éclot très fortement à partir du mois de septembre.

Le premier objectif est de faire chuter les populations sous le seuil de 1 J2/g avant la plantation de janvier-mars, que la variété plantée soit résistante ou non. Pour ce faire, on dispose de deux méthodes que l'on utilisera seules en cas de faible contamination ou associées en cas de forte contamination : solarisation en été et culture de pommes de terre pièges en septembre.

La plantation suivante pourra se faire avec une variété sans résistance. Si cette variété est du type Alcmaria et que la récolte a pu s'effectuer tôt, l'augmentation des populations est faible. S'il s'agit de Charlotte, la population en début d'été sera élevée. Dans le premier cas, on peut recommencer le même processus. Dans le second cas, il faudra de nouveau envisager solarisation et/ou cultures pièges en septembre.

L'utilisation prochaine de variétés résistantes précoces permettra de les alterner avec la variété Alcmaria, libérant l'exploitant de la contrainte de la date d'arrachage qu'il ne peut pas généraliser à toutes ses parcelles. Cette alternance ralentira *ipso facto* le contournement de la résistance et allongera d'autant la vie de ces variétés résistantes. En tout état de cause, elle permettra d'attendre la mise sur marché de variétés à QTL majeur dont l'utilisation alternée devra être calculée pour pérenniser le système de production.

### Remerciements

Nous remercions MM. M. Bozec, J.-P. Dantec et R. Pellé pour la création du matériel et la sélection végétale, ainsi que Mmes M. Oger et C. Rouault, et enfin M. D. Fouville pour la réalisation des tests de résistance.

### Références

Caromel B, Mugniéry D, Lefebvre V, et al. Mapping QTLs for resistance against *Globodera pallida* (Stone) Pa2/3 in a diploid potato progeny originating from *Solanum spegazzinii*. *Theor Appl Genet* 2003 ; 106 : 1517-23.

Caromel B, Mugniéry D, Kerlan MC, et al. Resistance QTLs originating from *Solanum sparsipilum* act independently on the sex-ratio of *Globodera pallida* and together for developing a necrotic reaction. *Mol Pat Microbe Int* 2005 ; 18 : 1186-94.

Ellenby C. Tuber-forming species and varieties of the genus *Solanum* tested for resistance to the potato root eelworm *Heterodera rostochiensis* Wollenberg. *Euphytica* 1954 ; 3 : 195-202.

Evans K, Stone AR. A review of the distribution and biology of the potato cyst-nematodes *Globodera rostochiensis* and *Globodera pallida*. *Pans* 1977 ; 23 : 178-89.

Evans K, Trudgill DL. Pest aspects of potato production. Part 1. The nematode pests of potatoes. In : Harris P, ed. *The Potato Crop*. 2nd edn. London : Chapman and Hall, 1992.

Huijsman CA. The influence of resistant potato varieties on the soil population of *Heterodera rostochiensis* Woll. *Nematologica* 1961 ; 6 : 177-80.

Janssen R, Bakker J, Gommers FJ. Mendelian proof for a gene-for-gene relationship between virulence of *Globodera rostochiensis* and the H1 resistance gene in *Solanum tuberosum* ssp. *andigena* CPC 1673. *Rev Nematol* 1991 ; 14 : 213-9.

Mugniéry D, Balandras C. Examen des possibilités d'éradication du nématode à kyste, *Globodera pallida* Stone. *Agronomie* 1984 ; 4 : 773-8.

Mugniéry D, Plantard O, Fournet S, et al. Évaluation de l'efficacité et de la durabilité des résistances à *Globodera pallida* Pa2/3, provenant de *Solanum vernei*, *S. spegazzinii* et *S. sparsipilum*. *Nematologia Mediterranea* 2007 ; 35 : 143-53.

Rousselle-Bourgeois F, Mugniéry D. Screening tuber-bearing *Solanum* ssp. for resistance to *Globodera rostochiensis* Ro1 Woll. and *G. pallida* Pa2/3 Stone. *Potato Res* 1995 ; 38 : 241-9.

Phillips MS. Inheritance of resistance to nematodes. In : Bradshaw JE, Mackay GR, eds. *Potato genetics*. Wallingford (United Kingdom) : CAB International, 1994.

Stone AR. *Heterodera pallida* n.sp. (Nematoda: Heteroderidae), a second species of potato cyst nematode. *Nematologica* 1972 : 263-72.

Turner SJ, Fleming CC. Multiple selection of potato cyst nematode *Globodera pallida* virulence on a range of potato species. I. Serial selection of *Solanum*-hybrids. *Eur J Plant Pathol* 2002 ; 108 : 461-7.