



RÉSUMÉ

Le projet Prabiotel, porté par le Ctifl, labellisé par le GIS PICLég et soutenu par le Casdar, a permis la mise en place d'études entre 2009 et 2011, dans différents bassins de production. Le réseau des partenaires s'était fixé comme objectif d'avancer dans la connaissance des pratiques améliorantes et de leur intégration dans les systèmes de culture, afin de pouvoir proposer aux producteurs de nouvelles solutions techniques pour la gestion des problèmes telluriques, que ce soient des nématodes ou des champignons pathogènes. Plus de 50 modalités de rotations différentes ont été suivies sur les trois années du projet. Si l'intérêt de la solarisation est confirmé, et ses conditions de mise en place validées, le projet a aussi permis d'avancer sur l'adaptation de la biofumigation et des espèces à utiliser dans les différents systèmes.

CONTROL OF SOIL PESTS AND PATHOGENS IN VEGETABLE CROPS - PRABIOTEL : TOWARD TECHNICAL SOLUTIONS

The Prabiotel project led by Ctifl, approved by the scientific consortium GIS PICLég and supported by the rural and agricultural development fund CASDAR, allowed studies to be implemented in various growing regions between 2009 and 2011. The goal defined by the network of partners was to advance knowledge of ways to improve practices and their integration into cultural systems, in order to offer growers new technical solutions for controlling soil pests and pathogens (nematodes or pathogenic fungi). More than 50 protocols for different crop rotations were monitored over the three-year project period. In addition to confirming the value of solarisation and validating the operational conditions, the project made headway on adapting biofumigation and the different species of plant material to be used in the various systems.

GESTION DES BIOAGRESSEURS TELLURIQUES EN CULTURES LÉGUMIÈRES

PRABIOTEL : UN PROJET POUR DES SOLUTIONS TECHNIQUES

Les partenaires de Prabiotel se sont mobilisés dans l'objectif de proposer des solutions techniques pour la gestion des bioagresseurs telluriques. Les conditions optimales pour la réussite d'une solarisation sous abri sont désormais validées. La biofumigation et l'apport de matière organique devront encore faire leurs preuves.



> DISPOSITIF EXPÉRIMENTAL SUR LE CENTRE CTIFL DE CARQUEFOU. PLANCHES SOLARISÉES, CULTURE DE MOUTARDE AVANT BROYAGE ET MÂCHE SOUS VOILE D'OMBRAGE.



LE CADRE GÉNÉRAL

Dans le cadre des appels à projets du Casdar, le Ctifl a porté le projet Prabiote, autour de la thématique de la gestion des bioagresseurs telluriques. Après sa labellisation par le GIS PIClé, il a été retenu et soutenu financièrement par le Casdar (voir Infos-Ctifl n° 252, juin 2009). Ce projet a fait intervenir 10 partenaires techniques. En outre, plusieurs équipes INRA et une équipe IRD ont contribué au projet. Tous les partenaires, impliqués dans des actions communes au sein du projet, ont travaillé en réseau, dans des zones de production réparties sur tout le territoire entre la Manche et les Bouches-du-Rhône. Ainsi, des dispositifs ont été mis en place et suivis sur 23 sites, représentant 40 rotations en cultures de plein champ et 25 rotations en cultures sous abris (Figure 1).

LES CULTURES ET LES BIOAGRESSEURS

En cultures sous abri, la rotation « de base » de tous les dispositifs était composée de salades en automne-hiver puis d'une solanacée ou d'une cucurbitacée au printemps-été. Les principaux bioagresseurs identifiés dans les tunnels sont des nématodes et des champignons. Les nématodes à galles du genre *Meloidogyne* provoquent des dégâts sur toutes les cultures de cette rotation, les cucurbitacées étant particulièrement sensibles. Des nématodes ectoparasites, identifiés comme appartenant au genre *Paratylenchus*, sont à l'origine de blocages de croissance des salades sur un des sites suivis par l'APREL.

Pour ce qui concerne les champignons, selon les parcelles, les principaux agents pathogènes étaient *Rhizoctonia solani*, *Sclerotinia* sp dont *S. sclerotiorum*, *Botrytis cinerea*, *Pyrenochaeta lycopersici* ou encore *Colletotrichum coccodes*.

Globalement, les dispositifs sous abri ont été mis en place sur des sols naturellement infestés, avec des antécédents de dégâts en culture. Aucune inoculation n'a été réalisée.

En cultures de plein champ, la rotation devait comprendre une culture de poireau ou une culture de carotte. Les

UN PARTENARIAT D'ENVERGURE

Le projet Prabiote a fait intervenir dix partenaires techniques. Que tous ceux qui se sont impliqués soient ici remerciés. Danielle Breton et Franck Vial au SILEBAN (société d'investissements et de développement des cultures légumières en Basse-Normandie), Serge Mevel et Brigitte Pelletier au CDDM (comité départemental de développement maraîcher en Loire-Atlantique), Henri Clerc et Denis Le Hir à Invenio (centre de recherche et d'expérimentation de la filière Fruits et Légumes d'Aquitaine), Jean-Michel Crestin, Marie Torres et Claire Goillon à l'APREL (Association provençale de recherche et d'expérimentation légumière), Hélène Védie et Christelle Aïssa-Madani au GRAB (Groupe de recherche en agriculture biologique), Anne Terrentroy et Laurent Camoin à la chambre d'agriculture des Bouches-du-Rhône, Daniel Izard à la chambre d'agriculture de Vaucluse, Frédéric Siri et Martial Chaix aux CETA de Sainte-Anne et d'Eyguières, François Villeneuve, Yannie Trottin, Véronique Baffert et Jean-Michel Leyre au Ctifl, sur les centres de Lanxade et Balandran.

Sur le domaine expérimental INRA d'Alénya Roussillon, un dispositif a aussi mis en place et suivi par Frédérique Bressoud et Laure Parès. Un grand merci à Frédérique pour l'animation du groupe abris.

En outre, plusieurs équipes INRA (équipe EPSOS de l'UMR BiO3P, Rennes-Le Rheu, Françoise Montfort et Vincent Faloya ; Unité Ecodéveloppement, Avignon, Marc Tchamitchian et Mireille Navarrete, et UMR Santé et Agroécologie du Vignoble, Bordeaux, Dominique Blancard) et une équipe IRD (UMR CBGP, Montpellier, Thierry Mateille) ont collaboré au projet sans y être contractuellement rattachés. Qu'ils en soient ici remerciés. Enfin, un grand merci à tous les producteurs, stagiaires, techniciens et ouvriers qui ont participé à la mise en place et au suivi des dispositifs.

bioagresseurs ciblés sont essentiellement des champignons : *R.solani*, *Pythium ultimum* ou *Thielaviopsis basicola*. Dans certains cas, des inoculations artificielles ont été réalisées dans les parcelles.

L'ENQUÊTE AUPRÈS DES PRODUCTEURS

LES PRATIQUES ACTUELLES

L'action 1 du projet avait pour objectif de cerner les pratiques améliorantes susceptibles d'être mises en œuvre, et surtout leur développement sur le terrain. Il s'agissait principalement, au travers d'enquêtes auprès de producteurs, d'identifier les pratiques déjà mises en œuvre dans la conduite des cultures, celles qui ne les « intéressaient » pas, et les raisons de ces choix (bénéfices attendus des pratiques, justifications des choix techniques, etc.). Ainsi a-t-il été possible de faire un état des lieux de l'utilisation réelle des pratiques sur le terrain, des verrous (techniques, pratiques, économiques, etc.) qui limitent leur développement, et des leviers qui pourraient permettre une évo-

lution de la situation.

Entre 2009 et 2011, 78 producteurs ont été rencontrés. Les exploitations se situent dans quatre bassins de production en plein champ, et deux bassins sous abri (Figure 1).

Concernant les cultures de plein champ, il ressort que l'utilisation d'une pratique améliorante n'est pas largement répandue. Seuls 9 producteurs sur les 42 rencontrés mettaient en place des engrais verts au moment de l'enquête.

Dans ces systèmes, qui reposent encore largement sur la désinfection chimique (avec le métam-sodium en région nantaise ou le dichloropropène dans les zones de production de carotte), c'est la seule pratique alternative qui semble se développer, essentiellement dans une optique d'amélioration des sols. Selon les bassins et les périodes d'implantation, il peut y avoir des espèces habituelles (par ex. le seigle, la vesce ou le triticale dans les cultures de plein champ du Sud-Est), qui apportent satisfaction aux producteurs d'un point de vue de leur mise en œuvre et des bénéfices attendus sur la structure du sol, l'apport d'éléments



organiques, d'azote, etc. De ce fait, les espèces cultivées ne sont pas forcément celles qui sont reconnues pour avoir un effet potentiel assainissant.

Les principaux freins évoqués par les producteurs à la mise en place de ces pratiques sont leur coût et leur faisabilité technique sur le terrain, puisque les conditions de mise en œuvre ne sont pas toujours optimales (ex. intercultures d'hiver en Basse-Normandie). Si l'effet assainissant n'a pas forcément toujours été validé dans les essais mis en place, notamment dans le cadre de Prabiotel, l'effet de fertilisation et d'apport de matière organique semble lui bien pris en compte par les producteurs.

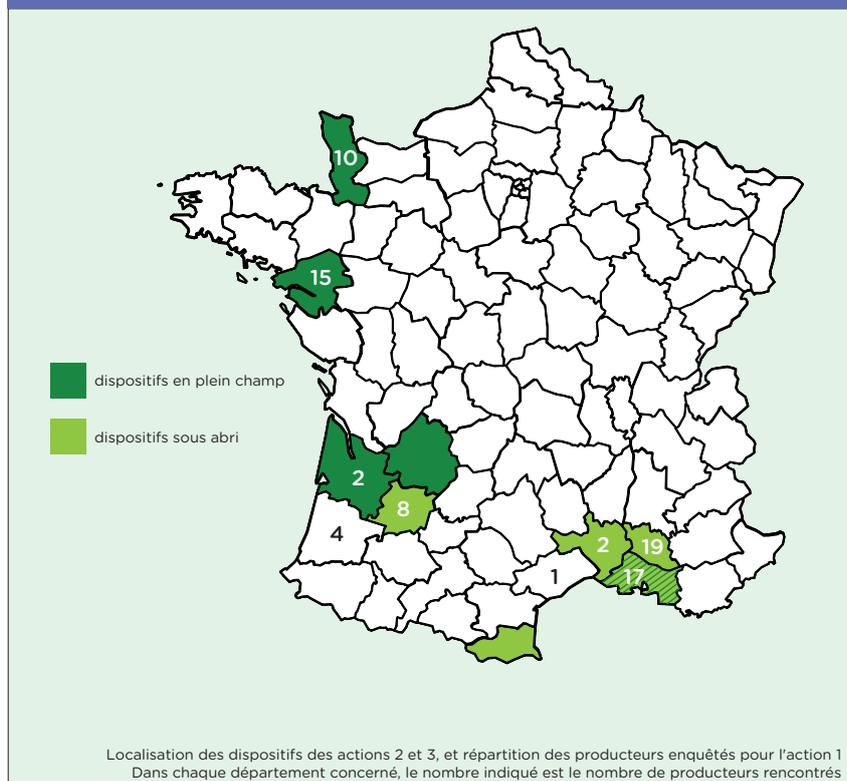
Concernant les cultures sous abri, les pratiques améliorantes semblent d'ores et déjà plus répandues. Là encore, c'est essentiellement la culture d'engrais vert qui est pratiquée (21 producteurs sur 36 enquêtés). Le sorgho est la culture la plus répandue, semée en été, derrière une culture courte (ex. melon). C'est l'effet d'apport de matière organique qui est principalement recherché, mais aussi le maintien ou l'amélioration de la structure et de la vie biologique du sol, et donc indirectement la protection contre les agents pathogènes. Cependant, ceci n'empêche pas nombre de producteurs de faire, en plus, des apports systématiques de matière organique (compost, fumier...), parfois à fort tonnage.

Au moment des enquêtes, la solarisation était pratiquée par 18 producteurs sur 36. Dans ce cas, l'objectif est plus clairement de « désinfecter » le sol et de lutter contre des problèmes telluriques avérés (notamment nématodes).

Le principal frein évoqué par les producteurs est la disponibilité des parcelles pour la mise en place des pratiques. Si la pratique est envisagée comme s'intégrant dans la rotation au niveau de l'exploitation, cela n'est possible que si la surface totale de l'exploitation est suffisante. Dans ce cas, une rotation incluant une pratique améliorante sur la période estivale 1 an/2 ou 3 est possible, avec des tunnels différents impactés selon les années. Mais pour les petites structures, ou celles qui sont très diversifiées, ceci est beaucoup plus difficile à mettre en œuvre. Sans oublier que, dans tous les cas, le producteur se prive de cultures

FIGURE 1 : Les actions 2 et 3 en plein champ et sous abri

Source : Ctifl



« commerciales » pendant une période plus ou moins longue.

LES ÉVOLUTIONS POSSIBLES

Les leviers qui pourraient permettre un développement des pratiques améliorantes sur le terrain sont souvent communs aux deux systèmes, en plein champ ou sous abri.

Les produits de désinfection sont en ce moment plutôt sur la sellette: métasodium en usage essentiel et ré-approuvé avec des applications limitées en doses et en fréquence, dichloropropène toujours non inscrit au niveau européen. De plus, ces produits présentent souvent des contraintes fortes pour leur utilisation: doses et fréquence d'apports, obligation de couverture, d'applicateurs agréés... On peut donc penser que les producteurs devront chercher des méthodes complémentaires qui auront, certes, une efficacité moindre à court terme, mais qui, raisonnées à plus long terme, permettront une amélioration de la qualité sanitaire des sols. On

peut aussi citer la directive Nitrates. Dans les zones vulnérables, à partir de 2012, les sols devront être couverts à 100 % en automne, soit par des cultures d'hiver, soit par une culture intermédiaire piège à nitrates (hormis les situations soumises à dérogation). Dans les zones non vulnérables, l'implantation de cultures intermédiaires est vivement recommandée. Si ces périodes sont habituellement sans cultures, elles représentent une bonne opportunité pour l'implantation d'un couvert qui pourrait être spécifiquement choisi pour ses propriétés assainissantes.

Chez les producteurs qui mettent déjà en place des engrais verts, on peut imaginer qu'il sera assez simple de favoriser le développement de l'utilisation de plantes assainissantes ou de la biofumigation. Il s'agirait uniquement de substituer aux espèces habituelles de nouvelles espèces, sous réserve bien sûr de leur adaptation aux conditions, et de garder les bénéfices attendus des engrais verts.



Enfin, le levier économique sera peut-être aussi un moyen de voir se développer les pratiques améliorantes. Par exemple, dans les cultures sous abri, la mévente de la salade pousse les producteurs à réfléchir à mettre « autre chose » en place dans les périodes concernées. Et ce pourrait être des engrais verts assainissants, avant les cultures de printemps-été.

Le projet s'est étendu sur une durée de trois ans. Si à l'échelle de l'expérimentateur cela semble assez court, en réalité, sur le terrain, des évolutions des pratiques peuvent déjà être constatées.

Par exemple, sur le bassin nantais, alors qu'à l'été 2009, au moment de l'enquête,

seul 1 producteur sur 15 semait des engrais verts, les conseillers constatent que depuis deux ans, cette pratique se développe sur la période estivale, avec des semis de graminées, mais aussi de moutarde brune. De même, sur quelques-unes des exploitations qui ont servi de « support » à des dispositifs, les producteurs ont vu en temps réel les résultats obtenus, et ont déjà décidé d'augmenter leur surface solarisée. Sur le terrain, les conseillers impliqués dans le projet ont pu sentir cet intérêt grandissant des producteurs. Enfin, commercialement, alors qu'au démarrage du projet il n'était pas si évident

de trouver un fournisseur de semences spécifiques pour la biofumigation, il y a maintenant plusieurs variétés, seules ou en mélanges, qui sont proposées par différentes sociétés. Elles revendiquent clairement une action « biofumigante », anti-nématodes, de fongicide naturel ou encore de limitation des adventices.

LES PRATIQUES AMÉLIORANTES

Le tableau ci-dessous recense les pratiques qui ont été évaluées dans le cadre du projet.

La solarisation a été essentiellement

TABLEAU 1 : DÉTAIL DES DIFFÉRENTES TECHNIQUES AMÉLIORANTES MISES EN PLACE DANS LES DISPOSITIFS SUIVIS PAR LES PARTENAIRES

	solarisation	engrais vert seul	engrais vert + bâchage ou solarisation	matière organique + bâchage ou solarisation	diversification	autre
Abris						
INRA Alénia	X		moutarde brune + 95-100 j		X	
Ctifl Balandran	X		moutarde brune + 10 j, radis fourrager + 10 j	fumier de cheval + 10 j		
APREL/CA13/CETA Eyguières			sarrasin + 60 j, moutarde brune + 60 j, radis fourrager + 60 j, sorgho	fumier de bovin + 60 j		
APREL/CA84	X	sorgho, moutarde brune				
INVENIO	X		moutarde brune + 7 - 14 j		X	tourteau de Neem
GRAB	X	sorgho, sésame	moutarde brune + 60 j, sorgho + 60 j, roquette + 60 j		X	tourteau de Neem
Plein champ						
Ctifl Lanxade		radis fourrager, seigle, mélange				
Ctifl Carquefou	X	moutarde brune	moutarde brune + 18 à 26 j			
CDDM		moutarde blanche, moutarde brune, mélanges	moutarde brune + 45 j			
SILEBAN station		avoine, seigle, moutarde brune				
SILEBAN producteurs		pois, vesce, moutarde brune, mélanges				
INVENIO		moutarde brune				
APREL/CETA de Sainte-Anne		navet, moutarde brune, mélanges				



évaluée sous abri, seule ou en « complément » (bâchage plus ou moins long) d'une culture de biofumigation. Plusieurs dispositifs ont aussi testé l'intérêt de la diversification des cultures et de l'apport de matière organique, dont le tourteau de Neem.

Dans les parcelles de plein champ, ce sont essentiellement les engrais verts et la biofumigation qui ont été évalués, avec plusieurs familles botaniques.

LA SOLARISATION

QU'EST-CE QUE C'EST ?

La solarisation est une technique développée depuis les années 1970 en Israël. C'est une méthode de désinfection (partielle) des sols, obtenue par élévation de sa température grâce à l'énergie solaire. La solarisation consiste à recouvrir le sol, préalablement préparé et humidifié, d'un film plastique. Le rayonnement solaire est transmis au sol et la couverture génère un effet de serre qui permet l'élévation de la température. L'eau agit comme un vecteur de la chaleur.

La solarisation est une méthode de protection des cultures « validée » et déjà utilisée par les producteurs, essentiellement sous abri, mais aussi en plein champ (par exemple dans les Pyrénées-Orientales). Malgré tout, les expérimentateurs ont voulu continuer à évaluer cette pratique, pour asseoir son développement en production et vérifier son efficacité sur différents bioagresseurs.

DES RÉSULTATS INTÉRESSANTS

La solarisation a été évaluée sur cinq dispositifs sous abris, et un dispositif en plein champ.

Outre son efficacité comme moyen de gestion des bioagresseurs telluriques, les différents dispositifs ont aussi permis d'évaluer l'importance des conditions de mise en place de cette technique.

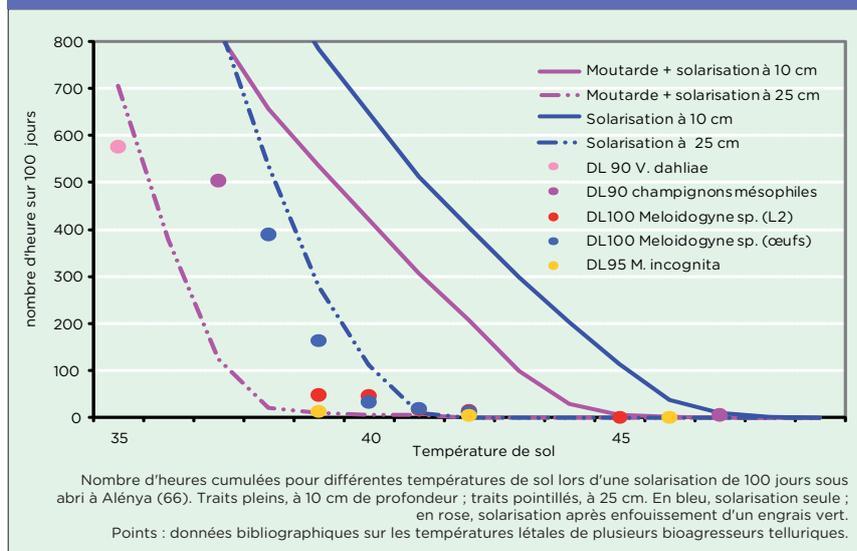
En plein champ, dans le bassin nantais, la solarisation a été difficile à mettre en place. Le principal écueil vient du fait qu'il faut assurer au démarrage une rapide montée en température du sol préalablement humidifié, pour détruire les adventices qui lèvent. Sur le site de Carquefou, deux années sur trois, cela



> COUVERTURE POUR SOLARISATION EN PLANCHES EN PLEIN CHAMP

FIGURE 2 : Courbes de cumul de température

Source : INRA Alénya



n'a pas été possible, et le pourpier, particulièrement, n'a pas été détruit. Les plantes qui lèvent se développent ensuite très bien dans le « microclimat » chaud et humide sous la bâche plastique, et la soulève, voire la perce, ce qui rend inopérante la solarisation. Sous abri, les niveaux de température atteints à 10 cm sont importants tout comme le cumul d'heures au dessus de seuils considérés comme létaux pour certains bioagresseurs. En profondeur, les températures atteintes sont en général plus faibles, mais la variation de température jour/nuit est plus faible et la chaleur s'accumule (Figure 2). Il est plus facile de « réussir » sa solarisation en respec-

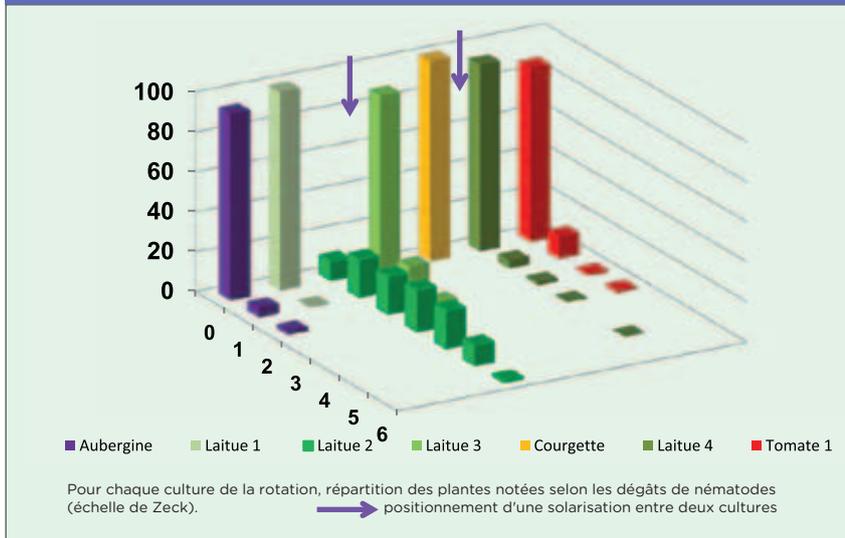
tant quelques consignes : période de démarrage, préparation et humidité du sol, maintien du plastique bien plaqué... D'où l'importance de bien maîtriser les conditions de mise en œuvre de la solarisation, si on vise des bioagresseurs qui ne se limitent pas à la couche superficielle de sol.

Dans les différents dispositifs suivis dans le projet Prabiote, la solarisation a montré son efficacité vis-à-vis de différents bioagresseurs. Elle a permis de diminuer de façon nette les indices de galles, symptômes d'attaques de nématodes, sur les sites de Balandran (Figure 3) et d'un producteur suivi par le GRAB, sur les salades. Son efficacité sur



FIGURE 3 : Effet de la solarisation sur les indices de galles

Source : Ctifl Balandran



> BROYAGE ET ENFOUISSEMENT D'UNE CULTURE DE MOUTARDE SOUS ABRI POUR BIOFUMIGATION

solarisation à une fréquence triennale ou quadriennale pourrait sans doute suffire. Ceci permet d'ailleurs de « faire tourner » les tunnels solarisés d'une année sur l'autre.

À noter toutefois qu'il semble que la solarisation soit une technique non sélective. Elle déprécie quantitativement aussi bien les nématodes phytoparasites que les non phytoparasites (observations complémentaires réalisées sur deux sites, Ctifl de Balandran et GRAB, dans le cadre d'un autre projet de recherche, Neoleg PICLég). En cas d'application trop fréquente (tous les ans, tous les deux ans?), la solarisation pourrait remettre en cause la durabilité de la qualité biologique des sols. C'est donc une technique à associer avec d'autres pratiques.

LES ENGRAIS VERTS ET LA BIOFUMIGATION

QU'EST-CE QUE C'EST ?

La distinction n'est pas forcément évidente entre engrais vert *stricto sensu* et couvert assainissant ou biofumigation. Les engrais verts sont des couverts végétaux implantés en interculture et destinés en général à être enfouis. Ils jouent un rôle important dans le maintien ou l'augmentation de la fertilité des sols: ils protègent et améliorent la structure, stimulent l'activité biologique, maintiennent la parcelle propre par étouffement des adventices et permettent une meilleure disponibilité des éléments fertilisants pour la culture suivante. En outre, leur rôle environnemental est fondamental: cultivés en interculture automnale, ils limitent le lessivage des nitrates et l'érosion des sols, qui sont autant d'inconvénients dus aux sols nus. La biofumigation consiste à « intoxiquer » les bioagresseurs par des composés volatils libérés lors de la dégradation de certains produits organiques. Sur le terrain, il s'agit par exemple de cultiver certaines espèces de plantes, notamment des brassicacées comme la moutarde, qui contiennent des composés à potentiel biocide. La dégradation cellulaire, suite à une agression parasitaire ou à un broyage mécanique des plantes, permet la mise en contact des glucosi-

les agents pathogènes fongiques a été mise en évidence sur les sites de Balandran (sur *R. solani* sur salades), de l'INRA d'Alénya (sur *B. cinerea* sur salades) et d'Invenio (Figure 4 sur *C. coccodes* sur aubergine, plus limité sur *R. solani* sur salades). La solarisation permet aussi de limiter le développement dans les parcelles des foyers de Big vein, dont le vecteur est le champignon *Olpidium virulentus* (anciennement *O. brassicae*). Concernant la persistance d'action de la solarisation, les trois ans du projet ne permettent pas de donner une conclusion nette. Sur un site suivi par le GRAB, par

exemple, alors que sur la salade qui suit la solarisation, les indices de galles sont divisés par 4 par rapport à la courgette qui précédait, ces indices sont à nouveau en hausse sur la courgette qui suit, même s'ils restent bien inférieurs à ceux de la courgette sur la parcelle n'ayant pas été solarisée. Il est possible que la persistance d'efficacité soit largement dépendante des niveaux d'infestation initiaux. Sur des sols très infestés, il pourrait être nécessaire de faire des solarisations plusieurs années de suite, afin de vraiment baisser les niveaux de bioagresseurs. Sur des sols plus faiblement contaminés, une



FIGURE 4 : Effet de la solarisation sur l'indice de nécrose racinaire de cultures d'aubergines greffées

Source : INVENIO, INRA Bordeaux

Culture été 2008				Culture été 2010 après solarisation 2009			
Rang 1	Rang 2	Rang 3	Rang 4	Rang 1	Rang 2	Rang 3	Rang 4
5		8	7				
6	8	8	8	6	5	6	8
7	8	7	8	7	7	4	6
6	5	7	7	6	8	4	5
6	6	5	8	5	2	4	5
4	6	8	7	0	0	4	4
8	8	7	4	1	0	2	4
6	7	7	5	0	5	0	1
4	7	6	5	0	0	1	3
7	6	7	8	0	0	0	3
8	7	8	6	0	0	3	2
7	6	7	6	0	0	4	2
7	7	6	8	0	0	5	0
6	6	8	6	5	0	0	0
4	7	7	6	1	0	1	0
7	7	7	8	0	0	0	6
7	4	6	7	0	1	0	1
5	6	5	7	0	0	0	0
8	6	6	5	2	0	0	5
7	6	5	7	0	0	0	1
4	5	7	7	3	7	0	4
6	5	7	7	1	7	0	1
3	5	6	7	2	0	1	0
7	8	7	6	0	7	3	4
6	7	4	8	1	7	0	5
4	7	5	7	0	7	6	6
5	5	7	6	0	6	0	5
5	5	7	5	8	8	8	6
2	8	9	8	7	7	1	7

Échelle de 0 = sain,
 5 = environ 50% de nécrose
 à 10 = totalement nécrosé

nolates avec l'enzyme myrosinase, en présence d'eau. L'hydrolyse qui s'en suit produit des isothiocyanates, qui sont des composés soufrés toxiques vis-à-vis de nombreux agents pathogènes. En outre, l'incorporation de cette matière organique fraîche induit aussi des modifications sur la vie microbienne du sol. Dans le cadre de PrabioteL, plusieurs espèces ont été mises en place dans une optique de biofumigation. Après incorporation des cultures broyées, le sol a été soit uniquement tassé/roulé, soit couvert d'un film plastique pour une durée plus ou moins longue (de 10 à 45 jours). L'objectif de cette couverture est d'abord de limiter la perte des composés toxiques volatiles. Si la période de couverture est suffisamment longue, on peut aussi cumuler les effets d'une solarisation aux effets de la biofumigation.

UNE MISE EN PLACE PAS SI ÉVIDENTE

Malgré la rédaction de fiches techniques en début de projet, la mise en place d'in-

tercultures dans un objectif de biofumigation n'a pas été sans poser quelques soucis sur le terrain. Concernant les conditions climatiques, si la moutarde brune s'est très bien développée pour des semis de printemps (Ctifl Carquefou, SILEBAN), les semis d'automne ont parfois été réalisés dans des conditions difficiles (SILEBAN, INVENIO). Cela a entraîné des levées très hétérogènes et limitées, et donc au final des biomasses produites souvent faibles, alors qu'il est nécessaire d'avoir une biomasse suffisante pour que les composés actifs libérés soit efficaces. D'autre part, la moutarde est gélive une fois montée. Il est donc indispensable qu'elle soit toujours au stade rosette lors des périodes hivernales (Ceta de Sainte-Anne). Dans les abris, la culture de moutarde brune a aussi pu être mise en place au printemps, en été ou en automne. Elle s'y révèle cependant moins rustique et adaptée que le sorgho, qui est déjà développé dans ces systèmes.

La moutarde brune s'est révélée sensible

à différents agents pathogènes, notamment *R. solani* en fin de printemps/été et *S. sclerotiorum* en automne/hiver. Elle est aussi sensible aux ravageurs du colza et serait hôte de nématodes *Meloidogyne* (GRAB). Dans ces conditions, son implantation doit être raisonnée en lien avec les autres cultures de la rotation et de l'exploitation. Ainsi, dans les zones où la rotation comporte déjà des crucifères, en Normandie par exemple dans ce projet, l'implantation d'une nouvelle espèce de cette famille en interculture peut être délicate.

Globalement, cette « nouvelle » interculture a pu surprendre les expérimentateurs. Si elle est amenée à se développer, il faudra valider les itinéraires culturaux à mettre en œuvre, en fonction des systèmes.

Dans une optique de biofumigation, il faut broyer la culture à un stade donné, optimal, puis rapidement enfouir et tasser et/ou couvrir. Sous réserve de disposer d'un matériel adapté (broyeur à marteau, rotavator...), cela ne pose pas



de problème lorsque les terrains sont praticables, par exemple sous les abris et en été en plein champ. Cela peut se révéler beaucoup plus difficile au printemps dans certaines zones, avec des terrains encore très humides (CETA de Sainte-Anne). En outre, le créneau d'implantation peut aussi être dépendant d'autres critères, comme par exemple les aléas du marché pour certaines cultures. Si le producteur ne peut/veut pas libérer sa parcelle pour des raisons de rentabilité, il sera amené à différer l'implantation de l'interculture. Il s'expose ainsi à de mauvaises conditions de mise en place, et donc à une moindre efficacité.

Cependant, quelles que soient les conditions et l'espèce choisie, il est important de rappeler que la plante en interculture doit être considérée comme une culture à part entière. Elle nécessite une conduite adaptée, notamment pour l'irrigation et la fertilisation, afin d'assurer une production de biomasse suffisante. Ceci pourrait freiner l'adoption de cette technique par des producteurs parfois réticents à investir pour une culture qui ne sera pas commercialisée.

UNE EFFICACITÉ PAS ENCORE VALIDÉE

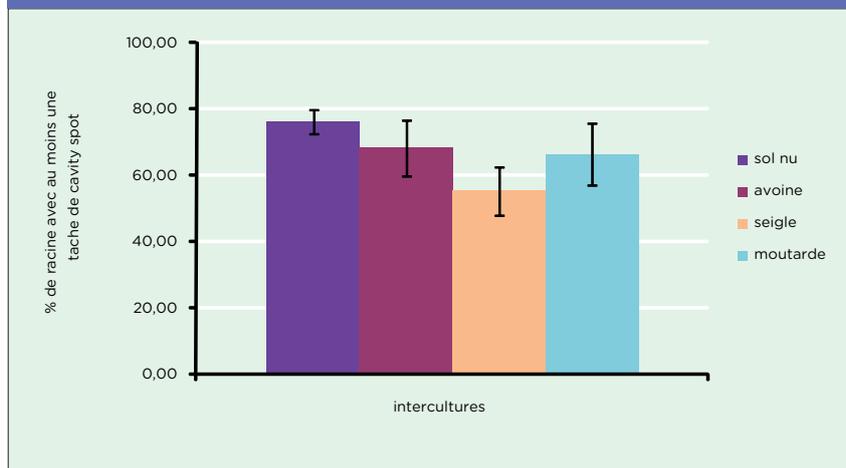
L'objectif de Prabioteel était de pouvoir proposer des techniques améliorantes s'intégrant dans les systèmes dans une optique de gestion des bioagresseurs telluriques. L'état sanitaire des différentes cultures a donc été suivi dans les rotations mises en place.

Globalement, il n'a pas été possible de réellement valider l'intérêt de la biofumigation. Dans certains cas, la pression parasitaire n'était pas suffisante, et ce malgré l'inoculation de certains dispositifs: Ctifl Carquefou les premières années, SILEBAN, INVENIO plein champ, GRAB en salades. Dans d'autres cas, le niveau de dégâts n'était pas nettement diminué suite à cette pratique, ou bien l'efficacité notée aurait besoin d'être confirmée: Ctifl Balandran, INVENIO abri, Ctifl Carquefou en dernière année...

Enfin, avec certaines espèces utilisées en interculture, des améliorations de l'état sanitaire ont pu être mises en évidence dans certains systèmes. Ainsi, sur le site suivi par le CETA de Sainte-Anne,

FIGURE 5 : Incidence du cavity-spot (*Pythium sulcatum*) sur culture de carotte, en fonction de l'interculture précédente

Source : SILEBAN



deux années successives d'interculture seigle + vesce en hiver ont permis de diminuer significativement la fréquence de *R. solani* sur la 2^e culture de pommes de terre, par rapport à des intercultures seigle + vesce puis moutarde brune ou seigle + vesce en 2^e année après culture de navet en dérobé en 1^{re} année. Sur le site du SILEBAN, l'interculture à base de seigle a montré une certaine tendance à réduire les niveaux de cavity spot (dû à *Pythium sulcatum*) sur carottes, et ce en situation de fortes attaques. Cet effet n'a pas été mis en évidence avec des intercultures d'avoine ou de moutarde (Figure 5).

Concrètement, il n'est pas encore possible, après les trois ans du projet Prabioteel, de préconiser aux producteurs de mettre en place une biofumigation dans leurs rotations, que ce soit avec de la moutarde brune ou avec une autre espèce, pour améliorer la qualité sanitaire des cultures. Les résultats d'efficacité ne sont pas assez démontrés. Cependant, certains résultats sont très encourageants et doivent être approfondis, aussi convient-il de ne pas abandonner cette piste. La mise en place d'intercultures a beaucoup d'autres intérêts, notamment agronomiques. Il serait donc intéressant de développer cette pratique dans les systèmes où les engrais verts sont encore peu répandus (en plein champ notamment). Lorsque davantage de références auront été acquises sur l'adaptation et l'intérêt des espèces et variétés

à effets biofumigants, elles pourront être proposées aux producteurs. Il est d'ailleurs à noter que si au démarrage du projet les fournisseurs proposaient très peu d'engrais verts affichant cet effet « sanitaire », plusieurs références commerciales sont désormais disponibles. L'intérêt de cette pratique, par rapport à la solarisation, est que, sous réserve d'espèces/variétés adaptées, elle pourrait être mise en œuvre à différentes périodes de l'année, sur les créneaux d'ordinaires vides, ou sur ceux où la perte de production serait la moins pénalisante.

ET LA COMBINAISON BIOFUMIGATION + SOLARISATION ?

La réelle combinaison de la biofumigation avec une solarisation assez longue (45 jours minimum) n'a été mise en place, sous abri, que sur le site de l'INRA d'Alénya et chez un producteur suivi par l'APREL, le CETA d'Eyguières et la CA 13. Sur le site des Bouches-du-Rhône, il est difficile de conclure sur l'intérêt de combiner ces deux techniques, car il n'y avait pas de comparaison avec les techniques utilisées seules. Cependant, sur ce site, il n'y a plus eu de problèmes sanitaires sur les cultures de salades hivernales. Sur le site d'Alénya, la combinaison des deux techniques a pu être comparée à la solarisation seule. Il ressort de cette comparaison que la culture de l'engrais vert puis son broyage et son incorporation entraîne une diminution



des températures atteintes pendant la solarisation, de l'ordre de 2 °C en moyenne. Ceci pourrait avoir pour conséquence de diminuer l'efficacité de la technique, si c'est essentiellement l'effet température qui est actif (Figure 2). Mais la combinaison a aussi des avantages, avec un possible cumul des effets. Notamment, la culture de l'engrais vert permet de maintenir les bioagresseurs en vie active, où ils sont ensuite plus sensibles à la solarisation. À Alénia, la biofumigation suivie d'une solarisation mise en place en 2009 a eu une meilleure efficacité que la solarisation seule sur *Sclerotinia* sur salade, et sur les nécroses racinaires des tomates. Cependant, ceci ne s'est pas confirmé en 2011.

LA DIVERSIFICATION ET AUTRES

Parmi les autres pratiques mises en œuvre dans le projet PrabioteL, l'insertion de plantes non hôtes dans les rotations a été évaluée sur plusieurs dispositifs. Dans un dispositif suivi par le GRAB, des cultures peu sensibles aux nématodes à galles ont été mises en place pendant trois ans, en comparaison à la rotation sensible courgette + salade. Cela a permis de voir une diminution des indices de galle sur les cultures. Cependant, la réintroduction en 2011 de la courgette, culture sensible, montre que la coupure n'a peut-être pas été suffisante. La culture de courgette (cv. Satellite) a un indice de galle de 4 (contre 8 en 2009) alors que les trois cultures précédentes avaient des indices inférieurs à 1. Il faut cependant nuancer ce résultat, car la sensibilité variétale a aussi un effet sur les indices de galle, même au sein d'une espèce sensible. Concernant l'effet sur les champignons pathogènes, à Alénia, la culture de tomate sensible aux nécroses racinaires a été remplacée en 2009 par une culture d'aubergine greffée. Dès 2010, la culture de tomate remise en place retrouvait un indice de nécrose équivalent à celui de la tomate produite avant l'aubergine. La rupture de cycle pendant un an ne permet pas de diminuer réellement le potentiel infectieux du sol. Sur ce dispositif il y a aussi eu une modification de la rotation en

hiver avec l'introduction d'une espèce peu sensible aux champignons pathogènes identifiés. Au final, le nombre de cultures de salades a été divisé par deux sur les trois ans. Cette rotation, associée à un entretien du taux de matière organique du sol, a permis de maintenir la pression parasitaire à son niveau initial. L'utilisation de plantes non hôtes doit être très finement réfléchie. Il faut connaître le spectre de bioagresseurs présents dans le sol, car, par exemple, une plante non hôte des nématodes à galles peut être très sensible à certains champignons telluriques. Il faut aussi bien connaître la gamme d'hôtes des agents pathogènes ciblés, pour ne pas mettre en place une plante qu'on croit, à tort, non hôte. D'un point de vue pratique, la diversification impose d'acquiescer des connaissances techniques sur les cultures à mettre en place : conduite, maîtrise sanitaire d'éventuels autres bioagresseurs... Il ne faut pas non plus oublier la partie commerciale. Ces nouvelles espèces cultivées doivent pouvoir être elles-aussi rentabilisées.

L'apport de tourteau de Neem a été évalué par INVENIO et le GRAB. Il n'y a eu que peu, voire pas, d'effet visible, alors que cette pratique a un coût élevé. Concernant le fumier de cheval apporté après la culture de tomate deux années consécutives sur le site Ctifl de Balandran, un net effet sur la structure du sol a été observé mais l'effet assainissant n'a pas été démontré de façon claire dans les conditions de l'étude sur trois ans.

DES EFFETS À VALIDER ET DES DÉVELOPPEMENTS À POURSUIVRE

Même si elles ne permettent de répondre que partiellement aux objectifs initialement posés, les trois années du projet PrabioteL ont largement contribué à améliorer les connaissances sur les pratiques améliorantes et leur intégration dans les systèmes de culture, et à promouvoir leur développement sur le terrain.

Ainsi, des résultats intéressants ont été obtenus sur des dispositifs mettant en place la solarisation. Cela encourage dès à présent les producteurs à intégrer

cette pratique dans leurs systèmes. Si les conditions de mise en œuvre et les effets assainissants de la biofumigation sont encore à valider dans certains cas, l'implantation d'engrais verts se développe, notamment en plein champ.

Au delà des références techniques obtenues, le projet a permis la mise en place d'une dynamique et d'un réseau d'échanges d'expériences et de résultats entre la recherche, les expérimentateurs et les agents du développement, permettant ainsi l'acquisition de références communes.

Ce développement sur le terrain a été bien ressenti par les conseillers de développement, impliqués dès le démarrage dans le réseau des partenaires de PrabioteL. La communication autour des dispositifs, les présentations de résultats et les échanges avec les professionnels lors de rencontres techniques ou de portes ouvertes ont aussi été des moyens privilégiés de transmission des informations. La journée nationale sur la gestion des bioagresseurs telluriques, organisée par le Ctifl sur son centre de Balandran, en juin 2012 en est un bon exemple.

Les études devraient se poursuivre, pour fiabiliser l'intérêt de ces pratiques à la fois sur les plans technique, économique et environnemental et leur utilisation par les producteurs, pour tous les systèmes de production de légumes.

Pour ce qui concerne les productions sous abri, le projet Gedubat, porté par le Ctifl et financé dans le cadre du réseau DEPHYEcophyto EXPE, va permettre de continuer ce travail en réseau. Ce projet Gedubat (Innovations techniques et variétales pour une gestion durable des bioagresseurs telluriques dans les systèmes maraîchers sous abris), d'une durée de six ans, rassemble cinq partenaires techniques déjà impliqués dans PrabioteL. Plusieurs équipes de recherche (INRA et IRD) et les animateurs de deux réseaux FERME sont aussi impliqués. Son objectif principal est de valider l'intérêt (agronomique, socio-économique et environnemental) et l'efficacité de l'utilisation de pratiques améliorantes, pour la gestion des bioagresseurs telluriques en systèmes maraîchers sous abri froid, dans l'optique de réduction de l'utilisation des produits phytopharmaceutiques chimiques (objectif Ecophyto 2018). ■