

Proposer des solutions techniques pour la gestion des bioagresseurs telluriques en cultures légumières : bilan du projet Prabiotel

Janvier C., Ade C.

Ctifl – Centre de Carquefou, 35 allée des Sapins, ZI Belle Etoile-Antarès, 44489 Carquefou Cedex

Correspondance : ade@ctifl.fr

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 3 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.

Mots-clés : pratiques améliorantes, bioagresseurs telluriques, réseau, biofumigation, solarisation

Abstract: Technical solutions for controlling soil pathogen in vegetable crops : achievements of Prabiotel project

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 pathogen fungi). More than 50 protocols for different crop rotations were monitored over the three-year project period. In addition to confirm the value of solarisation and validate the operational conditions, the project made headway on adapting biofumigation and on the different species of plant material to be used in the various systems.

Keywords: innovative practices, soil-borne pests and diseases, network, biofumigation, solarisation

Introduction

Dans le cadre des appels à projets du Casdar, le Ctifl a porté le projet Prabiotel, autour de la thématique de la gestion des bioagresseurs telluriques, travaillée depuis déjà plusieurs années (Bailey et Lazarovits, 2003 ; Janvier, 2007). Après sa labellisation par le GIS PICLég, il a été retenu et soutenu financièrement par le Casdar (Janvier, 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 abri (Figure 1).

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 (Djian-Caporalino, 2010). 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.

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

1. L'enquête auprès des producteurs

1.1 Les pratiques actuelles

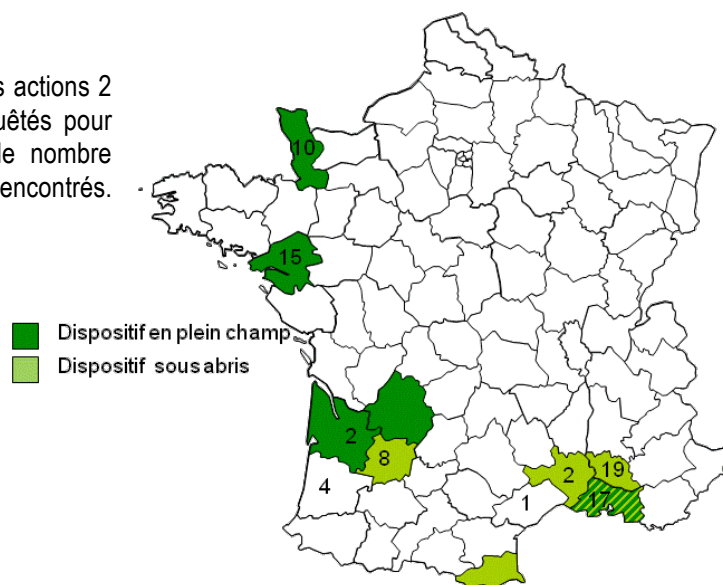
L'action 1 du projet avait pour objectif de cerner les pratiques améliorantes susceptibles d'être mises en œuvre, et surtout leur développement sur le terrain. Il s'agissait principalement, au travers d'enquêtes auprès de producteurs, d'identifier les pratiques déjà mises en œuvre dans la conduite des cultures, celles qui ne les "intéressaient" pas et les raisons de ces choix (bénéfices attendus des pratiques, justifications des choix techniques, etc.). Ainsi, il a 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 évolution 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).

Pour les cultures de plein champ, 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.

Figure 1 : Localisation des dispositifs des actions 2 et 3, et répartition des producteurs enquêtés pour l'action 1. Dans chaque département, le nombre inscrit représente celui des producteurs rencontrés. Source : Ctifl

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 bénéfiques 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 Prabioteel, 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 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, aussi, 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. Il faut également prendre en compte que, dans tous les cas, le producteur se prive de cultures « commerciales » pendant une période plus ou moins longue.

1.2. 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 (Bargain, 2009).

Les produits de désinfection sont en ce moment questionnés : métam-sodium 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 Nitrate. Dans les zones vulnérables, depuis 2012, les sols doivent être couverts à 100% en automne, soit par des cultures d'hiver, soit par une culture intermédiaire piège à nitrate (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 poussent les producteurs à réfléchir à mettre « autre chose » en place dans les périodes concernées, ce pourrait être des engrais verts assainissants, avant les cultures de printemps-été (Torres, 2010).

Le projet s'est étendu sur une durée de 3 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.

Ainsi, 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 2011, cette pratique se développe sur la période estivale, avec des semis de graminées, mais aussi de moutarde brune. De même, sur quelques 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 espèces et 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.

2. Les pratiques améliorantes

Le Tableau 1 recense les pratiques qui ont été évaluées dans le cadre du projet.

La solarisation a été essentiellement 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.

2.1 La solarisation

2.1.2 Qu'est-ce que c'est?

La solarisation est une technique développée depuis les années 1970 en Israël (Katan, 1996). 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.

2.1.2 Des résultats intéressants

La solarisation a été évaluée sur 5 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.

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 Alénya	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/C ETA 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 Ste-Anne		navet, moutarde brune, mélanges				

Sous abri, les niveaux de température atteints à 10 cm sont importants tout comme le cumul d'heures au dessus des 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 respectant quelques consignes : période de démarrage, préparation et humidité du sol, maintien du plastique bien plaqué... Il est important 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.

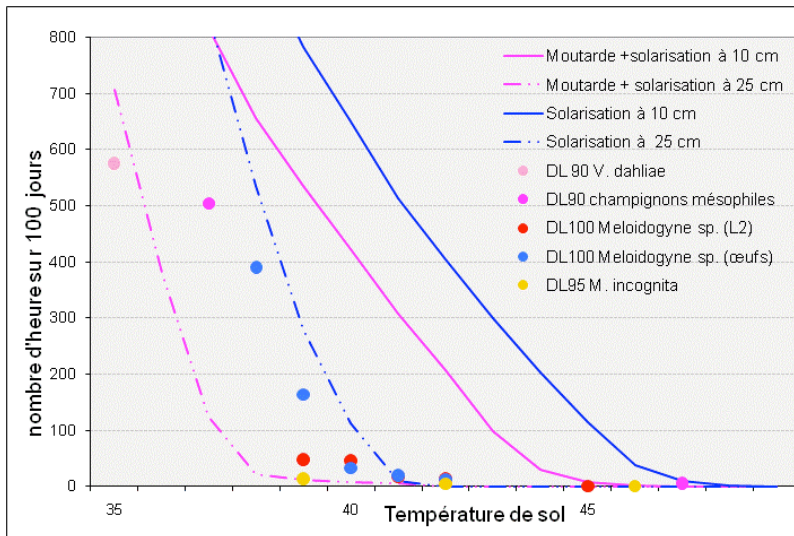


Figure 2 : Nombre d'heures cumulées pour différentes températures de sol lors d'une solarisation de 100 jours sous abri à Alénya (66). Traits pleins, à 10 cm de profondeur ; traits pointillés, à 25 cm. En bleu, solarisation seule ; en rose, solarisation après enfouissement d'un engrais vert. Points : données bibliographiques sur les températures létales de plusieurs bioagresseurs telluriques. Source : INRA Alénya

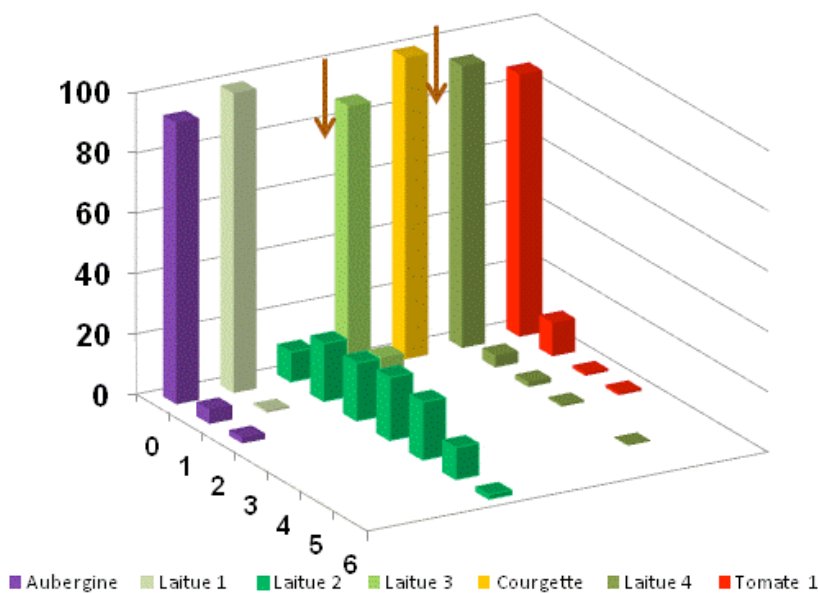


Figure 3 : Effet de la solarisation sur les indices de galle. Pour chaque culture de la rotation, répartition des plantes notées selon les dégâts de nématodes (échelle de Zeck). Flèche : positionnement d'une solarisation entre les deux cultures. Source : Ctifl

Dans les différents dispositifs suivis dans le projet Prabioteil, la solarisation a montré son efficacité vis-à-vis de différents bioagresseurs (Bressoud *et al.*, 2011). 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 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 (Tableau 2 sur *Colletotrichum 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 3 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 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.

A 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 projet de recherche [Neoleg PICLég]). En cas d'application trop fréquente (tous les ans ou 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.

2.2 Les engrais verts et la biofumigation

2.2.1 Qu'est-ce que c'est ?

La distinction n'est pas forcément évidente entre engrais vert *stricto sensu* et couvert assainissant ou biofumigation (Kirkegaard et Matthiesen, 2004).

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 (Motisi, 2009). La dégradation cellulaire, suite à une agression parasitaire ou à un broyage mécanique des plantes, permet la mise en contact des glucosinolates 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 (Kirkegaard, 2009).

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 volatils. Si la période de couverture est suffisamment longue, on peut aussi cumuler les effets d'une solarisation aux effets de la biofumigation (Bourgeois, 2011).

2.2.2 Une mise en place pas si évidente

Malgré la rédaction de fiches techniques en début de projet, la mise en place d'intercultures dans un objectif de biofumigation a posé 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 soient 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/adaptée que le sorgho, qui est déjà développé dans ces systèmes.

Tableau 2 : Effet de la solarisation sur l'indice de nécrose racinaire de cultures d'aubergines greffées. Echelle de 0 = sain, 5 = environ 50% de nécroses à 10= totalement nécrosé. Source Invénio, 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

La moutarde brune s'est révélée sensible à différents agents pathogènes, notamment *Rhizoctonia solani* en fin de printemps/été et *Sclerotinia 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.

2.2.3 Une efficacité encore non validée

L'objectif de PrabioteL 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 action 2, 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, deux années successives d'interculture seigle + vesce en hiver ont permis de diminuer significativement la fréquence de *R. solani* sur la 2^{ème} culture de pommes de terre, par rapport à des intercultures seigle + vesce puis moutarde brune ou seigle + vesce en 2^{ème} année après culture de navet en dérobé en 1^{ère} 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 4).

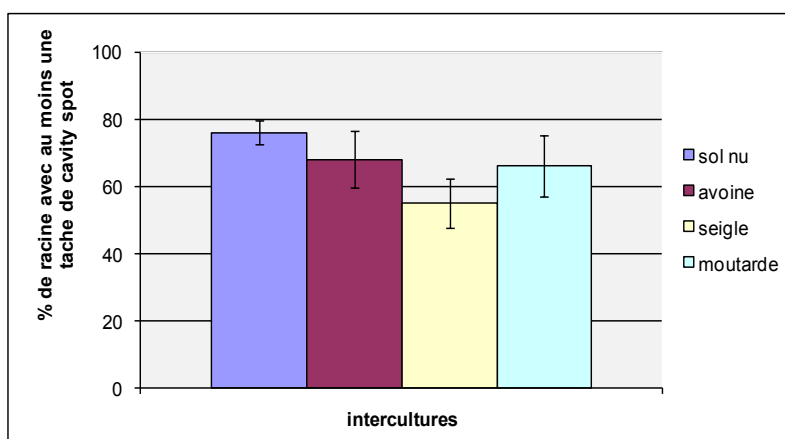


Figure 4 : Incidence du cavity-spot (*Pythium sulcatum*) sur culture de carotte, en fonction de l'interculture précédente. Source : SILEBAN

Concrètement, il n'est pas encore possible, après les 3 ans du projet PrabioteL, 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 très encourageants doivent être approfondis (Montfort, 2011 ; Motisi *et al.*, 2010). La mise en place d'intercultures a 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). Quand 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'ordinaire vides, ou sur ceux où la perte de production serait la moins pénalisante.

2.2.4 Et la combinaison biofumigation + solarisation ?

La réelle combinaison de la biofumigation avec une solarisation assez longue (45 jours minimum) a été mise en place, sous abri, 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 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. A Alénya, 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.

2.3 La diversification, et autres

Parmi les autres pratiques mises en œuvre dans le projet Prabioteel, 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 3 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 3 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 Alénya, la culture de tomates sensibles aux nécroses racinaires a été remplacée en 2009 par une culture d'aubergines greffées. Dès 2010, la culture de tomates 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 analysée. Il faut connaître le spectre de bioagresseurs ciblés. En effet, une plante non hôte des nématodes à galles peut être très sensible à certains champignons telluriques. Il faut 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 technique, la diversification impose d'acquérir des connaissances techniques sur les cultures à mettre en place : conduite, maîtrise sanitaire d'éventuels autres bioagresseurs... (Collange, 2011) 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 tomates 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.

En conclusion, 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 Prabioteel 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 (Janvier, 2012).

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 Prabioteel. 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 sur 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 et de profiter des méthodologies communes développées précédemment. Ce projet Gedubat (Innovations techniques et variétales pour une GEstion DUrable des BioAgressseurs Telluriques), d'une durée de 6 ans, rassemble cinq partenaires techniques déjà impliqués dans Prabioteel (Ctifl, INRA, Invenio, GRAB, APREL). 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 maraichers sous abri froid, dans l'optique de réduction de l'utilisation des produits phytopharmaceutiques chimiques et en particulier de l'IFT (objectif Ecophyto). Tout d'abord un état des lieux et une caractérisation des systèmes mis en place seront effectués, puis des combinaisons de méthodes, vues dans Prabioteel, seront introduites dans ces systèmes et évaluées. Enfin, une action de diffusion des systèmes les plus performants et les mieux adaptés est prévue vers les producteurs au sein des réseaux FERME.

Remerciements :

Que tous ceux qui se sont impliqués soient ici remerciés. Au SILEBAN, société d'investissements et de développement des cultures légumières en Basse-Normandie, Danielle Breton et Franck Vial ; au CDDM, comité départemental de développement maraîcher en Loire-Atlantique, Serge Mevel et

Brigitte Pelletier ; à Invenio, centre de recherche et d'expérimentation de la filière Fruits et Légumes d'Aquitaine, Henri Clerc et Denis Le Hir ; à l'APREL, Association Provençale de Recherche et d'Expérimentation Légumière, Jean-Michel Crestin, Marie Torres et Claire Goillon ; au GRAB, Groupe de Recherche en Agriculture biologique, Hélène Védie et Christelle Aïssa-Madani ; à la Chambre d'Agriculture des Bouches du Rhône, Anne Terrentroy et Laurent Camoin ; à la Chambre d'Agriculture du Vaucluse, Daniel Izard, aux CETA de Sainte-Anne et d'Eyguières, Frédéric Siri et Martial Chaix, au Ctifl, sur les centres de Lanxade et Balandran, François Villeneuve, Yannick Trottin, Véronique Baffert et Jean-Michel Leyre.

Sur le domaine expérimental INRA d'Alénya Roussillon, un dispositif a aussi été 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

Références bibliographiques :

Bailey K. L., Lazarovits G., 2003. Suppressing soil-borne diseases with residue management and organic amendments. *Soil & Tillage Research* 72, 169-180.

Bargain V., 2009. Vers l'utilisation de pratiques améliorantes. *Réussir Fruits et Légumes* 287, 32-35.

Bourgeois O., 2011. Dossier Biofumigation, Maîtrise des pathogènes du sol : La biofumigation, une innovation prometteuse, *Légumes Infos*, supplément au n°307 *Réussir Fruits et Légumes* de juin.

Bressoud F., Pares L., Clerc H., Trottin Y., Torres M., Aïssa-Madani C., 2011. Techniques alternatives de lutte contre les bioagresseurs telluriques, Synthèse des premiers résultats du réseau PraBioTel, *Cultures légumières*, hors série de septembre, 19-21.

Collange B., 2011. Vers une gestion agronomique des bioagresseurs telluriques en maraîchage sous abri : évaluation de systèmes de culture. Thèse de doctorat. INRA-Université de la Méditerranée Aix-Marseille II, France.

Djian-Caporalino C., 2010. Nématodes à galles, des ravageurs de plus en plus préoccupants. Résultats de 3 ans d'enquête dans quinze régions françaises. *Phytoma La défense des végétaux* 638, 43-49.

Janvier C., 2007. Recherche d'indicateurs de la santé des sols. Thèse de doctorat. INRA-INA P-G, Paris, France.

Janvier C., 2009. Maîtrise des bioagresseurs telluriques en cultures légumières – Vers l'utilisation de pratiques améliorantes : le projet Prabiotele. *Infos-Ctifl* 252, 46-51.

Janvier C., 2012. Prabiotele : un projet pour des solutions techniques – Gestion des bioagresseurs telluriques en cultures légumières. *Infos-Ctifl* 282, 47-55.

Katan J., 1996. Soil solarization: integrated control aspects. In *Strategies for Managing Soilborne Plant Pathogens*, edited by Hall, R. APS Press. St Paul, USA, 250-278.

Kirkegaard J.A., Matthiessen J., 2004. Developing and refining the biofumigation concept. *Agroindustria* 3, 233-239.

Kirkegaard J.A., 2009. Biofumigation for plant disease control - from the fundamentals to the farming system. In: Walters (Ed.), *Disease Control in Crops: Biological and Environmentally Friendly Approaches*. D. Wiley-Blackwell, Oxford, pp. 172-195.

Montfort F., 2011. Intérêt et faisabilité de la biofumigation avec des Brassicacées en cultures légumières de plein champ, Actes des Journées techniques Nationales, Fruits et Légumes

Biologiques – 7 & 8 décembre – Rennes, 37-4.

Motisi N., 2009. Réguler les maladies d'origine tellurique par une culture intermédiaire de Brassicacées : mécanismes d'action et conditions d'expression dans une rotation betterave-blé. Thèse de doctorat. INRA-Agrocampus Ouest, Rennes, France.

Motisi N., Doré T., Lucas P., Montfort F., 2010. Dealing with the variability in biofumigation efficacy through an epidemiological framework. *Soil Biology and Biochemistry* 42, 2044-2057.

Torres M., 2010. Les systèmes alternatifs de contrôle des pathogènes telluriques en maraîchage : analyse des modalités techniques et évaluation des risques d'infestation en exploitations agricoles. Mémoire de fin d'études. INRA-ISARA.