

Réduire l'impact des maladies telluriques dans les systèmes de cultures par une protection intégrée et durable des grandes cultures.

Gaucher D.¹, Champeil A.², Le Hingrat Y.³, Mille B.⁴, Garson S.⁵, Porteneuve C.⁶, Lhote J.M.⁷, Ruer D.⁸, Patoux V.⁹, Chatot C.¹⁰, Bouchek-Mechiche K.¹¹

¹ ARVALIS – Institut du végétal, station expérimentale, 9172 Boigneville ;

² ITB, 45 rue de Naples, 75008 Paris ;

³ FN3PT/EPR (Bretagne-Plants, Comité Nord, Comité Centre-Sud), 45 rue de Naples, 75008 Paris ;

⁴ INRA UMR IGEPP, Domaine de la Motte, 35653 Le Rheu ;

⁵ GITEP, 2 chaussée Brunehaut, 80200 Estrées-Mons ;

⁶ CTIFL, Le Glazic, 22740 Plemeur-Gautier ;

⁷ ACPEL, Le Petit Chadignac, 17100 Saintes ;

⁸ Coopérative agricole de Noirmoutier, Le Petit Chessé, 85330 Noirmoutier ;

⁹ Chambre d'agriculture Calvados région plaine, 1 rue d'Hermia, 14209 Hérouville-Saint-Clair ;

¹⁰ Germicopa R&D, Kerguivarc'h, 29520 Châteauneuf-du-Faou ;

¹¹ GNIS / INRA IGEPP, Domaine de la Motte, 35653 Le Rheu

Correspondance : d.gaucher@arvalisinstitutduvegetal.fr et k.bouchek@rennes.inra.fr

Résumé

Pour lutter contre le rhizoctone brun qui est problématique dans les rotations étudiées (pomme de terre, maïs et betterave), une stratégie de protection à l'échelle du système de culture s'impose. Dans un premier temps, le travail a permis de comprendre les processus épidémiologiques de *R. solani* AG3/pomme de terre et *R. solani* AG2-2/betterave, d'analyser les effets de la biofumigation sur les épidémies, et de donner des orientations pour le raisonnement de la protection intégrée. Dans un second temps, des expérimentations multi-sites ont montré que l'effet de la biofumigation seule est faible mais en complément avec d'autres techniques de lutte, elle peut apporter des gains de rendement et sans doute, à long terme, un maintien de la bonne qualité sanitaire des sols. Dans un troisième temps, un groupe d'expert des différentes cultures a permis d'élaborer des propositions pour l'amélioration des itinéraires techniques actuels et a conçu des systèmes plus intégrés.

Mots-clés : *Rhizoctonia solani*, épidémiologie, systèmes de cultures, protection intégrée, cultures intermédiaires, pomme de terre, betterave sucrière, maïs.

Abstract: Reducing the impact of soil-borne diseases in cropping systems for integrated and sustainable crops protection.

Black scurf (or root rot), *Rhizoctonia solani*, is a real pest to the studied crops (potato, maize and sugar beet), therefore its control strategy has to be investigated at the crop rotation level. In a first phase, studies have provided comprehensive elements about epidemiological processes of *R. solani* AG3/potato and *R. solani* AG2-2/sugar beet, analytical data about the effects of biofumigation on the epidemics, and the first contributions to implement integrated pest control methods. In a second step, multi-site experiments have shown that biofumigation by itself was not sufficient to control the soil borne fungus, whereas added to other control methods, could be beneficial to yield increase and most likely contributing to maintaining healthy soils in the long term. In the last part of the project, scientific and technical crop experts have collaborated to propose improvement of current *R. solani* control practices and to conceive more integrated cropping systems.

Keywords: *Rhizoctonia solani*, epidemiology, cropping systems, integrated pest management, intercropping crops, potato, sugar beet, maize.

Introduction

La maîtrise des maladies telluriques est cruciale pour les agriculteurs car les pathogènes concernés persistent longtemps dans le sol grâce à leur forme de résistance (sclérotés ou spores), s'attaquent à plusieurs cultures et sont capables de se maintenir sur leurs résidus (Bouček-Mechiche, 2012 ; Fiers et al, 2012). Pour réduire le stock d'inoculum dans le sol avant la mise en place de la culture, il est important de choisir des précédents non hôtes et bien gérer la période d'interculture. Suite à l'obligation de couvrir les sols en période d'interculture dans toutes les zones vulnérables, les agriculteurs demandent des informations sur les conséquences de ces changements sur la santé de leurs cultures. Les recherches conduites en France (Motisi et al, 2010 et 2013, Bouček-Mechiche et al, 2010) et à l'étranger ont mis en évidence en conditions d'expérimentation le potentiel assainissant de certaines plantes d'interculture (Brassicacées par exemple) mais leur mode d'action sur les maladies, leur efficacité en conditions de production et leur adaptation dans les systèmes de culture (par l'association de plusieurs techniques complémentaires) sont très peu étudiés.

Face aux évolutions du contexte agronomique et aux contraintes environnementales, l'objectif général du projet CasDAR SysPID était d'élaborer des stratégies de protection intégrée permettant de réduire les principales maladies du sol communes aux trois grandes cultures (pomme de terre, betterave, maïs) à l'échelle de la rotation. Pour atteindre cet objectif, un réseau de partenaires des principales filières concernées, regroupant chercheurs, expérimentateurs, agents de développement s'est constitué et a travaillé sur les trois volets suivants qui ont permis d'acquérir des données nécessaires pour le raisonnement de la protection intégrée à l'échelle du système de culture :

1. études des processus épidémiologiques mis en jeu au sein des systèmes de cultures ;
2. mise en œuvre de nouvelles techniques de lutte en période d'interculture ;
3. conception d'itinéraires techniques intégrés à l'échelle de la rotation culturale.

1. Études des processus épidémiologiques mis en jeu au sein des systèmes de cultures.

Pour comprendre le fonctionnement des épidémies dues aux pathogènes telluriques au cours d'un cycle cultural, il faut d'abord connaître les processus épidémiologiques impliqués dans le développement des cycles d'infection et de transmission de ces maladies. Une enquête réalisée auprès des producteurs a montré que *R. solani* est l'agent pathogène le plus problématique dans les rotations incluant pomme de terre, maïs et/ou betterave. Les processus épidémiologiques de deux pathosystèmes (*R. solani* AG3/pomme de terre et *R. solani* AG2-2/betterave) ont été étudiés, de façon spécifique selon l'état d'avancement des connaissances en épidémiologie.

1.1. Étude des processus épidémiologiques impliqués dans le développement du rhizoctone brun sur pomme de terre

1.1.1. Suivi de la cinétique de développement des différents symptômes provoqués par *R. solani* AG3 au cours d'une saison culturale au champ

Pour suivre la cinétique de développement de l'épidémie de *R. solani* sur pomme de terre, un essai pluriannuel est conduit au champ à l'INRA-IGEPP (2010 et 2012). Deux variétés de pomme de terre (Nicola et Atlas) de précocité similaire sont utilisées. Le sol est préalablement infesté avec une souche de *R. solani* AG 3 qui a été prélevée de la parcelle d'essai afin d'avoir une contamination homogène. Des prélèvements échelonnés sont effectués de la plantation à la récolte et les notations de symptômes sont effectuées sur tous les organes de la pomme de terre (tiges, stolons et tubercules). Les incidences et les sévérités sont calculées en se basant sur une échelle visuelle.

Les cinétiques de développement des symptômes sur les différents organes de la plante au champ sont similaires pour les trois années d'essais et pour les deux variétés testées (Figure 1).

L'épidémie se passe en trois temps (Bouček-Mechiche *et al*, 2013 ; Gaucher *et al*, 2012) : 1) des chancres précoces sur tiges et stolons avant la levée des plantes et leur incidence reste élevée tout au long de la période de végétation, 2) des altérations liégeuses apparaissent sur les tubercules dès la tubérisation, 3) des sclérotés sur tubercules se forment en fin de végétation. Après défanage, l'incidence et la gravité des sclérotés sur tubercules évoluent très rapidement. En effet, plus on allonge le délai défanage-récolte, plus les tubercules sont gravement atteints.

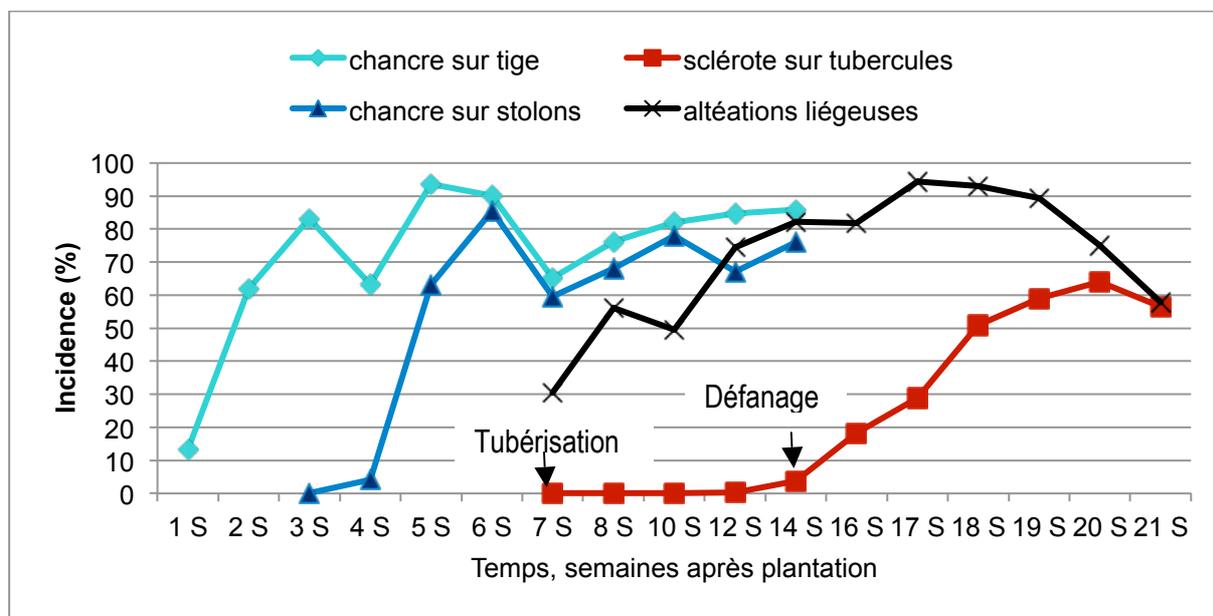


Figure 1 : Cinétique de développement des symptômes provoqués par *R. solani* AG3 au champ sur la variété Nicola (essai 2010). L'incidence représente le % de plantes présentant des symptômes

Un essai complémentaire réalisé en 2012 a montré l'importance de la densité d'inoculum du sol sur l'expression et l'intensité des symptômes (Bouček-Mechiche *et al*, 2013).

1.1.2. Études des processus épidémiologiques clés en conditions contrôlées (serre)

Source d'inoculum : les résultats ont montré l'importance égale des deux principales sources d'inoculum (sol et semence) et qu'une seule source d'inoculum suffit pour produire une épidémie de *R. solani*. Le plant porteur de sclérotés, même à un niveau faible (taux de recouvrement du tubercule inférieur à 10%), est une source importante de contamination de la descendance. De même, une faible quantité d'inoculum du sol suffit en conditions favorables à initier la maladie.

Température et âge de la plante : les infections sur les différents organes peuvent se produire sur une large gamme de température allant de 10 à 30°C. A température optimale 18/20°C, l'infection sur les tiges se produit au bout de trois jours quand l'inoculum est en contact avec la plante ou à proximité (1.5 cm). Une température basse (10°C) ralentit simultanément le développement du champignon, de la plante et retarde l'infection.

L'âge de la plante au moment de la contamination : l'apport d'inoculum à différents âges de la plante montre que l'âge de la plante a un effet sur l'incidence et la gravité des chancres sur tiges (les tiges âgées sont moins sensibles à l'infection (Figure 2). A l'opposé, les tubercules sont sensibles aux sclérotés quelle que soit la date d'inoculation (Bouček-Mechiche, 2013).

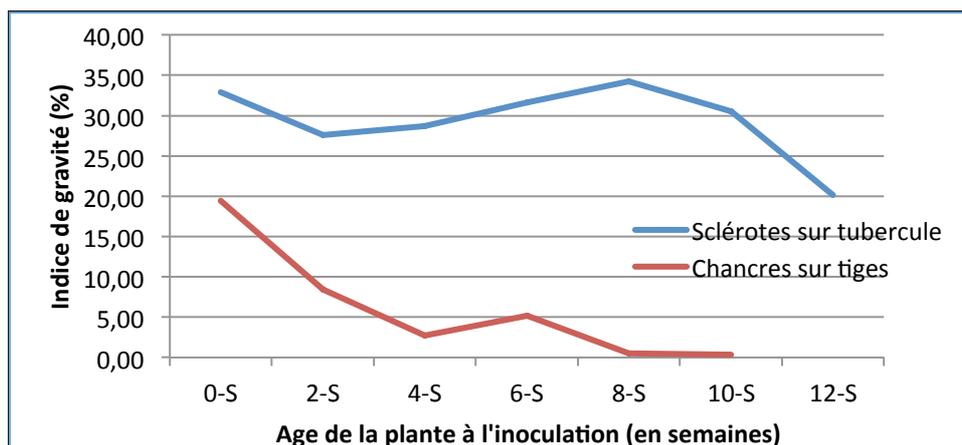


Figure 2 : Effet de la date d'inoculation/âge de la plante sur la sensibilité des tiges et des tubercules à *R. solani* AG 3, l'indice de gravité est calculé à partir du % de recouvrement des tiges et des tubercules par les symptômes.

Propagation de la maladie au sein de la plante à partir de tissus infectés : de jeunes plantes de pomme de terre (âgées de deux semaines) infectées au champ sont mises en culture dans un sol non contaminé pour suivre le développement de la maladie à partir des tissus infectés. Le mycélium se propage rapidement des germes vers les organes nouvellement formés (tiges, stolons et tubercules fils) en provoquant d'importants symptômes. Ces résultats montrent que l'inoculum primaire initie la maladie tandis que l'inoculum multiplié sur la plante (secondaire) propage la maladie sur les différents organes au fur et à mesure de leur apparition (Bouchek-Mechiche, 2013).

Dissémination de la maladie d'une plante à l'autre : nous avons mis en évidence l'existence d'infections secondaires d'une plante infectée vers une plante voisine saine, en serre. La transmission de la maladie vers les plantes saines, se produit après trois semaines quand les plantes donneuses (malades) et receveuses (saines) sont distantes de 15 cm. Des études complémentaires en serre ont montré : 1) que la contamination plante à plante est possible à des distances de 30 cm (distance sur le rang entre deux plants au champ), 2) qu'en présence de la plante hôte, le champignon exploite le sol pour développer son réseau mycélien 3) que le contact racinaire entre plantes augmente le taux d'infection. Ces résultats sont en accord avec ceux obtenus sur le pathosystème *R. solani* AG2-2/Betterave sucrière.

L'ensemble de ces résultats donnent des orientations pour le raisonnement de la protection intégrée vis à-vis de ce pathogène. Du fait que la contamination est précoce et que l'importance de l'épidémie dépend de la densité d'inoculum, il est important de mettre en place des stratégies pour diminuer le stock d'inoculum dans le sol avant la mise en place de la culture. La pomme de terre étant sensible sur toute la durée de son cycle de culture et tous ses organes étant sensibles, il est nécessaire de combiner plusieurs leviers à l'échelle de la culture et de la rotation. Tous ces éléments ont été raisonnés pour la conception de système de culture diminuant la pression du rhizoctone (voir volet 3).

1.2 Modélisation spatio-temporelle des dynamiques épidémiques de *R. solani* AG2-2 sur la betterave sucrière.

L'objectif final est d'analyser les effets de la biofumigation sur le développement des épidémies de rhizoctone brun dans une culture de betterave sucrière. Pour ce faire, il est, dans un premier temps, crucial de comprendre le plus finement possible comment la maladie se propage en conditions réelles de culture. Ici deux processus épidémiologiques clés sont d'abord étudiés. Ce travail est réalisé dans le cadre d'une thèse financée par ce projet et l'ITB (contrat CIFRE) (Leclerc, 2013).

1.2.1 Capacité de dispersion du pathogène dans le sol et influence de la croissance racinaire des plantes sur le développement des épidémies

Dans un premier temps, la dispersion de *Rhizoctonia solani* a été étudiée expérimentalement en mesurant la probabilité d'infection entre une plante hôte-receveuse et un inoculum-donneur pour différentes distances de contact et plusieurs temps d'exposition (Figure 3). Les pathozones obtenues pour un inoculum primaire (cinq grains d'orge infestés) et un inoculum secondaire (une betterave infectée) mettent en exergue i) une faible capacité du champignon pathogène à se développer dans le sol sans un accès facile à d'importantes sources de nutriments (plantes hôtes par exemple) et ii) l'importance du phénomène de translocation pour le développement du réseau mycélien des Basidiomycètes en conditions réelles (Jacobs et al., 2004). Ainsi, les infections secondaires de plante à plante peuvent se produire, de manière significative, à des distances plus importantes que les infections primaires.

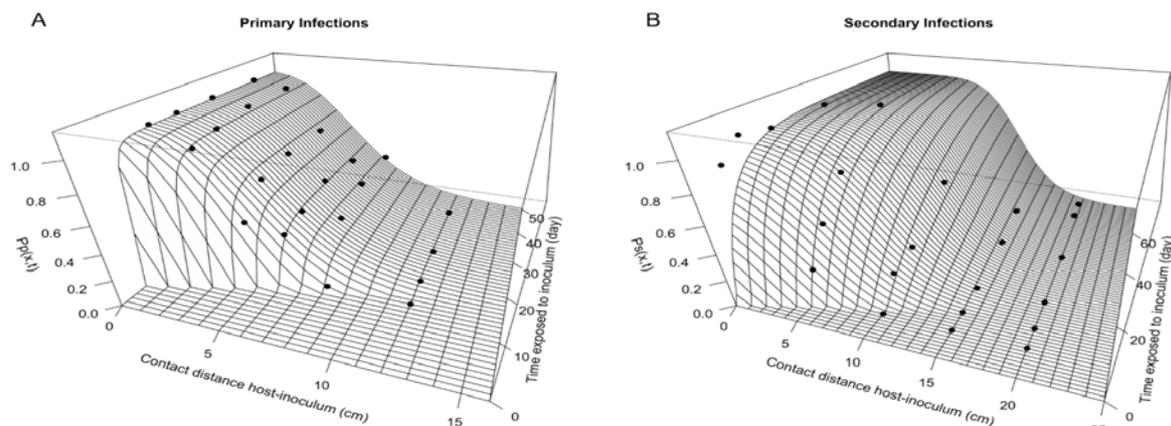


Figure 3 : Profils de pathozone obtenus pour deux sources d'inoculum-donneur: A) un inoculum primaire correspondant à cinq grains d'orge infestés par *R. solani*, B) un inoculum secondaire correspondant à une betterave malade. Les dynamiques des pathozones sont représentées par une surface décrivant l'évolution de la probabilité que l'hôte-receveur soit infecté par l'inoculum-donneur en fonction de la distance de contact et du temps d'exposition.

Dans un second temps, les résultats de simulation par un modèle spatialement explicite montrent clairement que le développement cryptique du système racinaire des plantes peut favoriser la propagation des pathogènes telluriques, et, par conséquent amplifier les dégâts sur les cultures.

1.2.2 Etude de la période d'incubation

Ce travail a pour but d'établir une relation entre la date à laquelle une plante est infectée par le champignon *R. solani* et le moment où cette même plante présentera des symptômes caractéristiques de la maladie sur ses parties aériennes. Pour cela, la période d'incubation a été mesurée expérimentalement au champ à partir d'inoculations artificielles. Ensuite, un modèle empirique a été construit afin de prédire l'évolution (moyenne et variabilité) de la période d'incubation en fonction de l'âge. Les résultats montrent une augmentation du temps moyen entre infection racinaire et apparition des symptômes de maladie et de sa variabilité quand l'âge augmente (Leclerc et al., 2014). En d'autres termes, plus une épidémie de rhizoctone brun démarre tard dans la période de culture, plus le délai entre les infections et l'observation de la maladie sera long et variable, et, plus le rapport nombre de plantes malades détectées / nombre de plantes réellement infectées sera important à la récolte (Leclerc 2013).

1.2.3 Analyse des effets de la biofumigation sur le développement des épidémies de rhizoctone brun

Il s'agit ici d'analyser les effets de la biofumigation sur le développement du rhizoctone brun de la betterave en utilisant les connaissances nouvelles obtenues sur les processus épidémiologiques, et, des données obtenues lors d'une expérimentation réalisée au champ en 2007 où trois modalités de gestion de la moutarde brune (*B. juncea*) ont été testées (témoin sans moutarde, culture de moutarde sans enfouissement des résidus et culture de moutarde avec broyage et enfouissement des résidus). La moutarde est semée à 8 kg/ha et a produit 2.33 t/ha de matière sèche (Motisi et al 2009 ; Motisi et al., 2013; Leclerc, 2013). Ce travail de modélisation montre que, même si la transmission plante-à-plante du pathogène reste lente, les infections secondaires favorisées par la diminution de la distance entre plantes voisines jouent un rôle prépondérant dans le développement des épidémies. Cette analyse réactualisée des données de 2007 confirme que la biofumigation (complète ou partielle) ne permet qu'un contrôle partiel des épidémies et que, dans ce cas précis, elle a permis une réduction des taux d'infection primaire et secondaire (Figure 4). La comparaison des résultats pour les traitements « biofumigation complète » et « biofumigation partielle » met en évidence l'effet non-négligeable de la phase « en culture » de la moutarde brune puisque la biofumigation partielle a induit une diminution de l'incidence. Enfin, les prédictions obtenues à partir de simulations d'un modèle stochastique démontrent que la biofumigation peut réduire la variabilité et donc l'incertitude autour du développement spatio-temporel de la maladie (Figure 4).

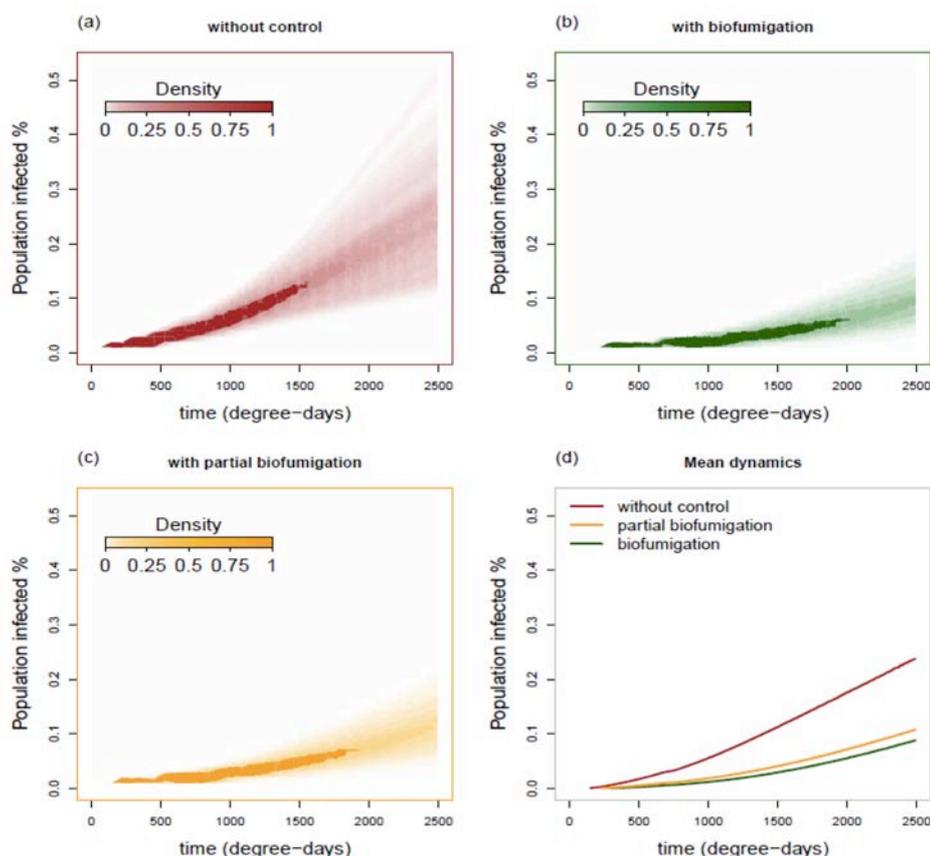


Figure 4 : Prédiction du développement des épidémies de rhizoctone brun dans une culture de betterave à sucre. (a) sans biofumigation, (b) avec une biofumigation réalisée en interculture et (c) avec une biofumigation partielle (moutarde arrachée au lieu d'être broyée et enfouie dans le sol au moment de la floraison). Les prédictions ont été obtenues à partir d'un modèle stochastique spatialement explicite. Dans chaque cas les résultats proviennent de 1000 simulations et (d) représente le développement moyen de la maladie.

Pour ce cas d'étude où trois modalités de gestion de la moutarde, le contrôle partiel des épidémies est peut être dû à une modification des équilibres microbiens du sol (stimulation d'antagonistes ou de compétiteurs par exemple), induite par les exsudats racinaires de la moutarde brune (Motisi et al., 2010) qui a fait évoluer le sol vers un état moins favorable au développement du champignon pathogène. Enfin, le faible gain apporté pour le broyage et l'enfouissement du couvert de moutarde sur cet essai pourrait s'expliquer par des conditions non-optimales pour favoriser la synthèse d'ITCs (isothiocyanates) à partir des glucosinolates lors du broyage de la moutarde (manque d'eau par exemple) (Leclerc, 2013 ; Motisi et al., 2013).

2. Mise en œuvre de nouvelles techniques de lutte en interculture.

Le développement épidémique d'une maladie lors d'un cycle de culture dépend de l'évolution de l'inoculum tout au long de la succession culturale. En effet, l'évolution du réservoir d'inoculum primaire va dépendre des précédents culturels et de leurs modes de conduite, de la gestion de la période d'interculture : sol nu ou interculture, élimination ou incorporation des résidus dans le sol, évolution de la décomposition des résidus de culture sous l'influence de certaines pratiques (travail du sol, labour ou non labour, ...).

2.1 Influence de la gestion des résidus des cultures précédentes (enfouissement ou exportation des pailles)

L'enfouissement de résidus (pailles de blé) dans un sol (initialement artificiellement contaminé) semble permettre le maintien de l'inoculum, mais il est ensuite rapidement défavorable au développement du rhizoctone durant la culture de pomme de terre (Figure 5). La gestion des parcelles est à noter : il n'y a pas eu de labours mais des travaux superficiels réguliers en interculture afin d'éliminer les adventices et de favoriser la décomposition des résidus. Ces résultats observés lors des deux premières années peuvent ainsi résulter du développement d'une microflore (et/ou d'une microfaune) antagoniste de *Rhizoctonia*, comme le suggèrent de nombreux auteurs dans la littérature (Bailey & Lazarovitz 2003, Chung et al 1988, Noble & Coventry 2004). Étant donné que les cinétiques d'évolution de la matière organique semblent identiques pour les deux traitements, l'antagonisme serait plutôt dû à une composition différente de la microflore/microfaune entre les situations de « paille enfouie » et « paille exportée ». Les résultats obtenus la 3^{ème} année, en absence d'inoculation artificielle, contrarient les observations des deux premières années : la situation initialement favorable au rhizoctone en début de culture en « paille enfouie » ne s'inverse pas ensuite. L'hypothèse est que les faibles teneurs en matière organique au moment de la plantation n'ont pas permis une activité microbiologique antagoniste suffisante pour freiner le développement du rhizoctone. En conclusion, dans la mesure où la teneur en matière organique du sol est nécessaire à sa structure et sa fertilité, la préconisation est de maintenir cette teneur à un niveau suffisant et donc d'incorporer les résidus de culture et de multiplier les travaux superficiels, pour favoriser les processus de dégradation des résidus végétaux et reproduire les résultats obtenus lors des deux premières années d'essai. Des expérimentations complémentaires, comportant des caractérisations de l'évolution de la matière organique et des activités microbiologiques seraient à envisager.

2.2 Gestion de la période d'interculture par insertion d'un couvert

De nombreux essais ont été mis en place par les différents partenaires durant les trois années du projet (Normandie, Picardie, Ile de Noirmoutier, Bretagne, Val de Loire). De nombreuses plantes d'interculture ont été testées durant ces trois années : moutarde brune et blanche, radis, avoine, seigle, phacélie, ... La gestion de la moutarde brune qui est l'interculture commune à tous les essais a été réalisée selon un protocole commun (variété utilisée, date et densité de semis, stade de destruction, mode de broyage et d'enfouissement). Sur l'ensemble des résultats obtenus, aucune tendance favorable vis-à-vis de la lutte contre les parasites de présentation des pommes de terre ou contre le rhizoctone brun en betterave n'a pu être identifiée ; les résultats étant très souvent non significatifs statistiquement et selon les cas

légèrement défavorables, légèrement favorables ou neutres. Par contre, d'autres effets ont pu être confirmés : actions bénéfiques sur la gestion de l'azote, éventuellement sur le niveau de rendement,...

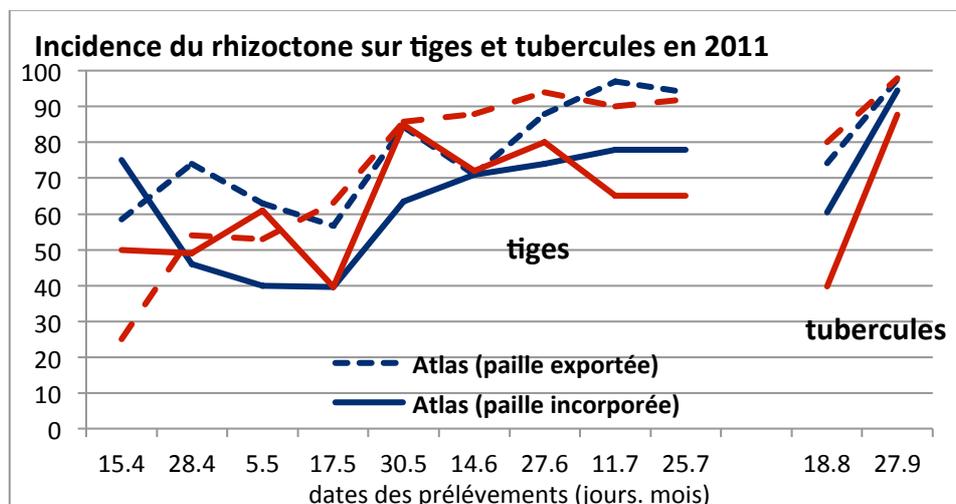


Figure 5 : Effet de la gestion des pailles de blé sur la contamination des tiges et des tubercules par le rhizoctone brun sur 2 variétés de pomme de terre (2011).

2.3 Effet combiné de la gestion de d'interculture avec d'autres pratiques

La biofumigation étant une technique à efficacité modérée et dont les résultats sont fonction de la densité d'inoculum du sol (Bouček-Mechiche et al, 2010 et 2011), il apparaissait nécessaire de tester son association avec d'autres techniques de lutte comme la résistance variétale ou l'application de traitements fongicides sur le sol à différentes doses.

En combinaison avec un autre facteur de l'itinéraire technique, la présence d'une culture intermédiaire devient souvent très minoritaire. C'est le cas, avec des variétés de résistances différentes, et/ou avec des traitements fongicides (doses pleines ou réduites) appliqués sur le plant ou dans le sol. En Bretagne, un essai mené par Bretagne Plant (Gueltas, Morbihan, 2010 ; Figure 6) a montré un léger effet du radis en interculture sur la contamination des tubercules et tiges de pomme de terre par le rhizoctone brun mais un effet beaucoup plus marqué est obtenu par des traitements de plants (40% d'efficacité) mais surtout du traitement du sol (75% d'efficacité). En Val de Loire, un essai mené par Arvalis (Saint-Martin-d'Abbat, Loiret, 2010) a montré un effet plus important de la tolérance variétale au rhizoctone et aux gales communes que celui de l'implantation d'une interculture avant pomme de terre (Figure 7).

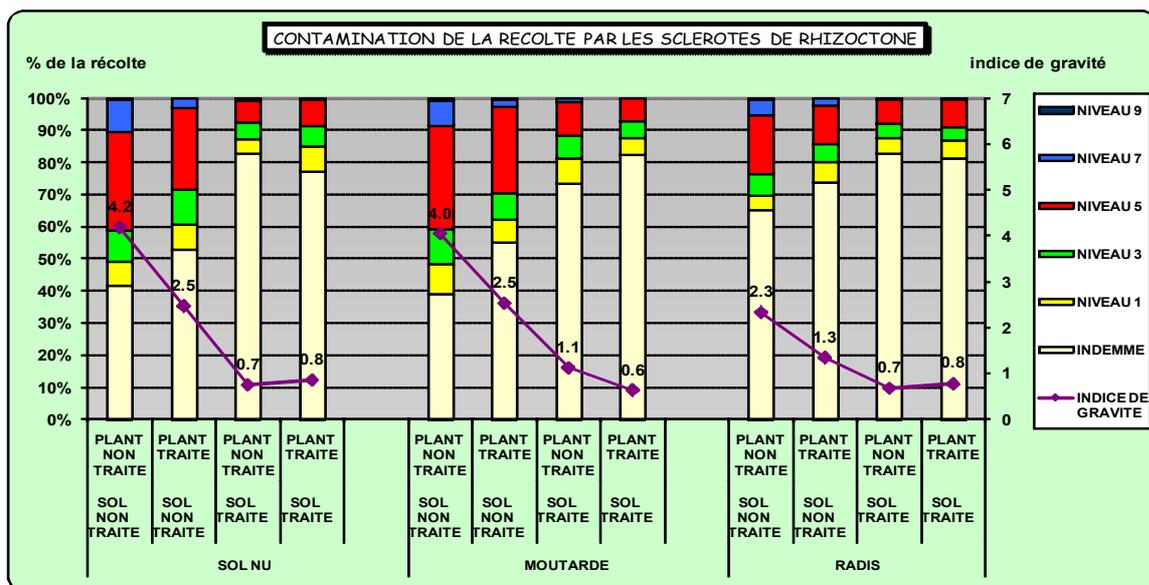


Figure 6 : Effet des cultures intermédiaires seuls ou en combinaison avec des fongicides (traitements des plants et/ou de sol) sur la contamination de la récolte par le rhizoctone brun : notation par classes de gravité d'indemne à 9 (35% de la surface du tubercule couverte par les sclérotés)

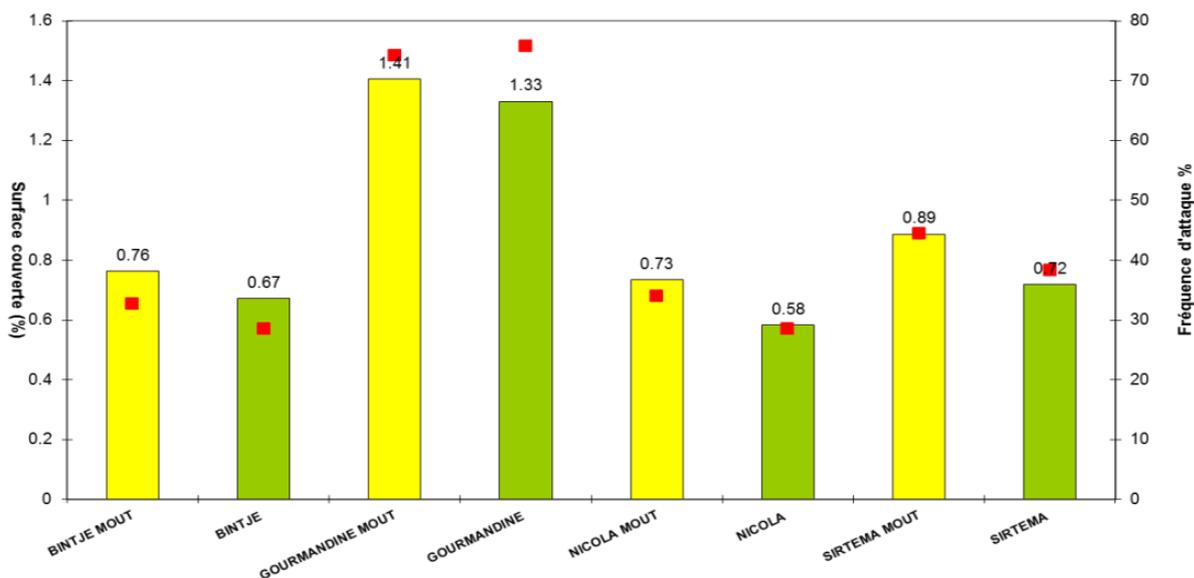


Figure 7 : Effet d'une culture intermédiaire de moutarde brune en combinaison avec la tolérance variétale sur la contamination de la récolte par la rhizoctone brun (fréquence d'attaque en carré rouge, surface couverte en bâtonnets colorés).

3. Conception de nouveaux systèmes de culture limitant la pression de rhizoctone brun dans les rotations incluant pomme de terre, betterave et/ou maïs.

Ce travail vise à mettre au point des stratégies de protection intégrée contre le rhizoctone brun sur l'ensemble du système de culture : 1) définir les systèmes de culture à étudier, 2) identifier les pratiques

bénéfiques, 3) les hiérarchiser en fonction de leur efficacité, 3) les assembler dans des itinéraires techniques et des systèmes de culture.

3.1 Etat des lieux des pratiques favorables à partir d'analyses d'enquêtes.

L'objectif de ce travail est de faire un état des lieux des différents systèmes de cultures actuels impliquant au moins deux des cultures étudiées, afin d'identifier les principaux systèmes de cultures contraints par des attaques de maladies telluriques dans les différentes régions et d'identifier les pratiques ressenties par les agriculteurs comme étant à risques ou bénéfiques. Après la conception d'un questionnaire par un groupe d'experts des différentes filières, l'enquête est menée et concerne des exploitations situées dans différents bassins de production qui ont dans leur rotation au moins deux des trois cultures. Cette enquête a permis de recueillir et d'exploiter 39 questionnaires.

Le rhizoctone brun est identifié comme étant le principal agent pathogène commun aux trois cultures. D'autres agents pathogènes spécifiques à chaque culture ont été également identifiés (ex : gales communes de la pomme de terre, rhizoctone violet de la betterave). Après analyse des pratiques des agriculteurs enquêtés, il a été possible de dégager des pratiques culturales (Tableau 1) qui favorisent ou, au contraire, limitent les risques liés aux maladies telluriques identifiées au sein de leurs exploitations. Il a été possible de dégager un certain nombre de combinaisons de facteurs favorables pouvant apparaître comme des scénarios à risques. D'autre part, certaines pratiques culturales permettant de limiter les problèmes de maladies telluriques (rhizoctone entre autres) ont été identifiées. Ces scénarios ont été pris en compte pour la conception d'itinéraires de protection intégrée.

	Pathosystème Gale commune en pustule - Pomme de terre	Pathosystème Rhizoctone brun Pomme de terre	Pathosystème Rhizoctone brun - Betterave	Pathosystème Rhizoctone brun - Maïs	Pathosystème Rhizoctone violet - Betterave	Pathosystème Rhizoctone violet - Pomme de terre
Renseignements généraux						
Pâturage durant une longue période	X	X	X	X	X	X
Chaulage	X	X	X	X	X	X
Boues ou eaux de sucrerie		?	X	?	X	X
Itinéraire technique						
Excès de sable de Maerl	X	X	X	X	X	X
Mauvaise gestion de l'irrigation	X	X	X	X	X	X
Renseignements sur les rotations						
Rotation courte	X	X	X	X	X	X
Fréquence moyenne de retour de culture sensible > 50%	X	X	X	X	X	X
Problématique accrue par :						
Utilisation de variété sensible	X	X	X	X	X	X
Délai défanage - récolte trop long	X	X	X	X	X	X
Travail du sol						
Broyage grossier	X	X	X	X	X	X
Résidus de cultures sensibles enfouis	X	X	X	X	X	X
Problème de battance - asphyxie	X	X	X	X	X	X

Tableau 1 : Synthèse des pratiques à risque présenté par pathosystème (la croix indique le risque).

3.2 Conception d'itinéraires techniques de protection intégrées

Des groupes d'experts techniques des différentes cultures se sont réunis plusieurs fois afin de synthétiser des expertises techniques et scientifiques disponibles (Champeil et al, 2012).

3.2.1 Identification et hiérarchisation des principales règles de décision pour lutter contre le rhizoctone

Seules les pratiques les plus efficaces sont listées ici. Leur hiérarchisation prend en compte leur efficacité, leurs incidences sur le cycle épidémiologique du champignon (conservation, survie, croissance, vitesse d'infection...), les précautions prophylactiques et la facilité de mise en œuvre.

1. Comment choisir sa parcelle ? Choisir une parcelle sans trop de risques infectieux (préalablement observés) pour l'implantation d'une culture très sensible telle que du maïs semence ou de pommes de

terre, plants ou pommes de terre de consommation lavées, afin d'éviter tout contact entre le champignon et une culture sensible. Allonger la rotation : une rotation de quatre ans minimum est recommandée (six ans entre deux cultures hôtes serait encore mieux).

2. Faut-il nettoyer le matériel agricole ? Il est vivement conseillé de nettoyer le matériel, si on le peut, en sortant d'une parcelle contaminée. Cela réduit la propagation du champignon (et d'autres parasites) à d'autres parcelles.

3. Comment alterner les cultures en rotation ? En privilégiant l'alternance entre les cultures hôtes et non hôtes (céréales à paille dans nos régions par exemple) de *R. solani*, pour diminuer l'inoculum dans une parcelle. En cas d'une succession de deux cultures de printemps, introduire une céréale, si possible céréale d'hiver pour rompre le cycle des adventices. Parmi les céréales d'hiver, si le semis d'une orge d'hiver est possible, il est préférable à celui d'un blé d'hiver pour davantage diversifier les cultures présentes dans la rotation et donc la flore du sol. Deux successions font exception à cette règle, il est possible de réaliser : une culture de pomme de terre à la suite d'une culture de légumes hôtes, lesquels laissent vraiment très peu de résidus contaminants, une culture de maïs à la suite d'une culture de pomme de terre car elle permet un désherbage efficace des repousses de pommes de terre.

4. Quelle gestion des résidus de culture par le travail du sol ?

Etape 1 : limiter les résidus en raisonnant "la culture précédente" : Eviter les précédents laissant beaucoup de résidus : maïs, colza, blé noir, cultures intermédiaires détruites tardivement (privilégier les précédents de type céréales à pailles et légumes).

Etape 2 : favoriser la dégradation des résidus : les exporter ou les broyer finement, les éparpiller et les incorporer superficiellement le plus régulièrement possible en les mélangeant bien au sol pour favoriser leur contact avec la flore du sol, même quand le labour suit immédiatement.

Etape 3 : diminuer la quantité de champignon en culture de pomme de terre et de betterave, en optimisant la destruction des repousses tout au long de la rotation.

5. Quelle gestion de l'irrigation ? Assurer une gestion de l'irrigation au plus près du besoin des plantes (en utilisant un OAD par exemple) en réduisant les périodes humides du sol. Éviter ainsi les stress hydriques et les excès d'eau afin de limiter la multiplication et la mobilité du champignon.

6. Comment choisir et quelle gestion des cultures intermédiaires dans la rotation ? Ne pas planter de culture intermédiaire trop rapidement, mais réaliser avant l'implantation un bon travail du sol superficiel (et des faux semis si le risque adventices est important) pour favoriser la dégradation des résidus, des adventices et aider à la gestion des taupins ou limaces. De préférence avant les cultures très sensibles, dans l'objectif d'assainir le sol, choisir une crucifère (moutarde brune, radis) riche en glucosinolates favorisant la biofumigation en s'adaptant aux conditions de réalisation idéales. Pour restructurer le sol et développer la flore du sol antagoniste de *R. solani*, privilégier le trèfle, le seigle, la gesse ou l'avoine en évitant le ray-grass (plante-hôte). Si possible, ne pas labourer entre l'enfouissement de la culture intermédiaire et l'implantation de la culture suivante ou le plus tardivement possible.

7. Quel compost peut-on apporter ? Apporter du compost le plus mature possible pour éviter l'apport de résidus non dégradés et favoriser la flore antagoniste à *Rhizoctonia solani*.

8. Quel choix variétal pour limiter les dégâts, en limitant le développement des attaques ? Des variétés de betterave double tolérantes rhizomanie-rhizoctone brun sont intéressantes en cas de production sur parcelle fortement contaminée. Des sensibilités de lignées en maïs semence existent. Il convient d'estimer le niveau de risque de rhizoctone pour évaluer la possibilité de les cultiver.

En pomme de terre, de faibles différences de sensibilité variétale peuvent être observées au champ. Elles peuvent être complétées par des pratiques culturales, telle la réduction du délai défanage - récolte, d'où l'intérêt de choisir une variété dont la peau subérise rapidement.

9. D'autres éléments de réflexion à l'échelle de l'itinéraire technique d'une culture ?

Date de semis, fertilisation, protection chimique...

3.2.2. Application aux systèmes de cultures étudiés

Afin d'explicitier ces règles de décisions, et leurs mises en œuvre, elles ont été appliquées à trois systèmes de cultures (les résultats sont publiés dans une brochure de synthèse conçue par le groupe d'experts et disponible sur le site internet des partenaires ITB, ARVALIS, ...):

- systèmes betterave-maïs en Alsace et en Limagne,
- système maïs-pomme de terre en Bretagne,
- système pomme de terre-betterave en Picardie et dans le Nord de la France,

3.2.3. Critères d'évaluation

La durée du projet (trois ans) n'a pas permis de tester et d'évaluer les itinéraires techniques qui ont été conçus dans les systèmes comprenant les trois grandes cultures étudiées (pomme de terre, maïs et betterave). Néanmoins des critères d'évaluation des systèmes de culture conçus ont été listés (Champeil et al, 2012).

3.3 Test au champ d'itinéraires techniques innovants

Seul le système de production de pommes de terre primeur soumis à la forte pression du rhizoctone brun (île de Ré) et conduit traditionnellement en monoculture a permis de tester et d'évaluer les itinéraires techniques conçus. L'objectif consiste à expérimenter différents itinéraires techniques intégrés en combinant sur quelques années des pratiques complémentaires (biodésinfection, rotations, solarisation). Les différentes modalités testées étaient les suivantes :

- monoculture de pomme de terre,
- insertion d'une culture intermédiaire assainissante dans la monoculture,
- insertion d'une solarisation du sol et d'une interculture assainissante dans la monoculture
- insertion d'une rotation avec de l'orge (allongement de la rotation) et d'une interculture assainissante.

L'impact des différentes pratiques culturales sur les niveaux d'attaques de rhizoctone brun et sur les rendements (Figure 8) de la récolte a été évalué sur les cultures successives de pomme de terre primeur des printemps 2010, 2011, 2012 et 2013.

- Le témoin (= monoculture de pomme de terre) présente un potentiel de rendement brut très faible avec une proportion importante de déchets (liés au rhizoctone brun) et donc un rendement net extrêmement faible dans cette parcelle choisie pour sa pression parasitaire.
- La modalité « moutarde brune » présente chaque année des résultats similaires à la monoculture de pomme de terre (malgré une biomasse enfouie correcte aux automnes 2010 et 2011). En accord avec certains travaux (Bouček-Mechiche et al., 2011 et 2012), la biofumigation du sol de Ré vis-à-vis du rhizoctone brun par la seule interculture de moutarde brune n'a pu être formellement démontrée dans les conditions de l'essai (forte pression d'inoculum du sol, un broyage de la moutarde trop grossier, des conditions trop sèches au moment de l'enfouissement).
- La modalité « moutarde brune et solarisation » se différencie favorablement sur le rendement net et sur le taux de déchets (significativement différent) en 2011. Deux ans après la solarisation, sur la pomme de terre en 2012, l'effet de la solarisation est toujours présent et apporte un gain de productivité et de qualité des tubercules en comparaison de l'itinéraire de référence. En 2013, on ne retrouve pas l'effet bénéfique de la seconde solarisation réalisée durant l'été 2012. Ceci pourrait s'expliquer par le fait que cette seconde solarisation n'a pas été réalisée à l'optimum : sol trop sec à la mise en place de la bêche (mauvaise transmission de l'énergie dans le sol) et un travail du sol trop profond avant la plantation du printemps 2013 (possible remontée de l'inoculum des couches inférieures).

- La modalité « moutarde brune et rotation » se différencie sur les rendements brut et net en 2011. Cet itinéraire apporte un gain de productivité et de qualité des tubercules (pourcentage significativement supérieur de tubercules indemnes de trace de rhizoctone) en comparaison de l'itinéraire de référence. Les conditions météorologiques de septembre 2012 n'ayant pas été propice à l'implantation d'une culture de moutarde brune pendant l'interculture, les effets observés sur la récolte 2013 sont le résultat de l'implantation de la culture intermédiaire deux ans auparavant.

L'introduction de techniques améliorantes et leur combinaison dans un système de monoculture ont amélioré la qualité sanitaire des tubercules de pomme de terre ainsi que le rendement des récoltes. Cependant, l'intensité des effets de ces pratiques dépend de la réussite de leur mise en place, de la densité d'inoculum et des conditions pédoclimatiques, ce qui peut expliquer les résultats décevants obtenus en 2013.

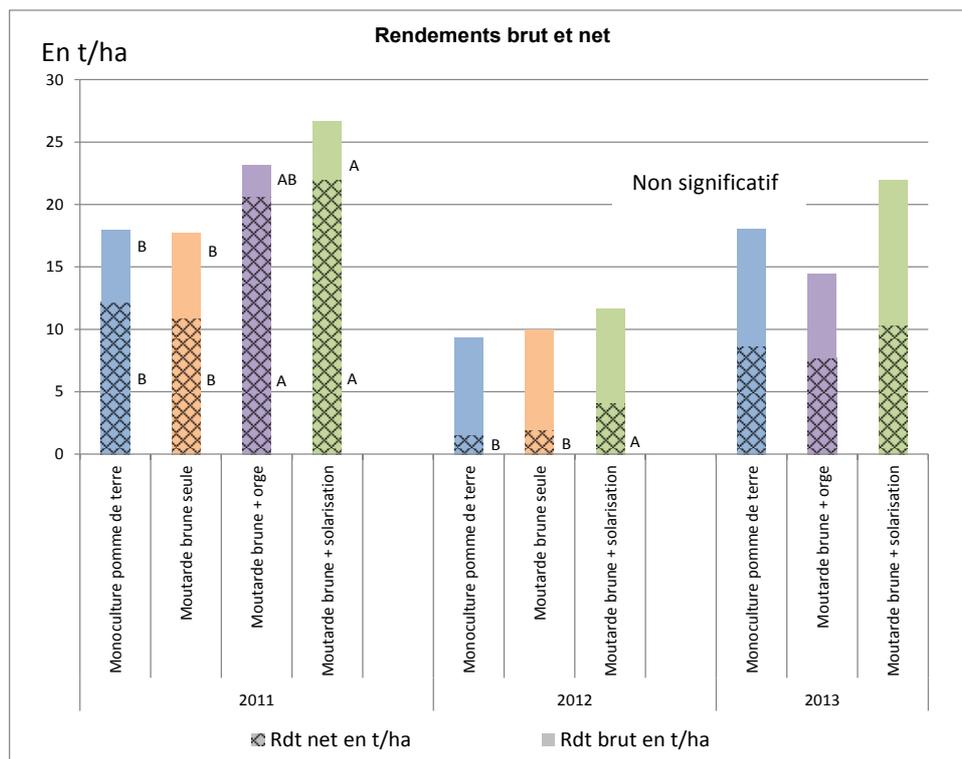


Figure 8 : Effet des différentes pratiques testées sur les rendements brut et net en tonne de tubercules/ha. Les analyses statistiques sont réalisées par année sur le rendement (brut et net).

Conclusions

Le projet SysPID nous a permis d'avancer sur les connaissances épidémiologiques de *R. solani* AG-3 et AG2-2 qui ont été utiles pour la mise en place des stratégies de protection intégrée dans les différents systèmes de culture étudiés. Les résultats de l'étude alliant expérimentation et modélisation confirment que la biofumigation ne permet qu'un contrôle partiel des épidémies. Il semble donc que les techniques de lutte contre les maladies telluriques basées sur des méthodes agronomiques présentent des niveaux d'efficacité faible à moyen ce qui nécessiterait de les combiner et répéter sur de nombreuses années pour voir les effets. La durée du projet (trois ans) n'a pas permis de tester et d'évaluer les itinéraires techniques qui ont été conçus dans les systèmes de cultures étudiés. Ce travail doit se poursuivre dans le cadre d'expérimentations avant de les valider auprès des agriculteurs.

Remerciements :

Aux personnes et partenaires impliqués dans la mise en place et le suivi des travaux. Ce projet a bénéficié du concours financier du ministère de l'agriculture via le compte d'affectation spéciale « développement agricole et rural » dans le cadre de l'appel à projets Innovation et Partenariat 2009.

Références bibliographiques.

Brochure « Réduire la pression du rhizoctone brun en grandes cultures », septembre 2013 (téléchargeable sur le site de certains partenaires du projet Syspid).

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

Bouček K., 2012. Altérations superficielles des tubercules de pomme de terre : Etat des connaissances. Dossier Pomme de terre, *Phytoma - La Défense des Végétaux*, N° 650 janvier 2012, p. 6-11.

Bouček-Mechiche K., Mille B., Montfort F., 2010. Un couvert pour soigner le sol. In *La Pomme de terre française*, pp. 45-46. - ASCL

Bouček-Mechiche K., Mille B., Gaucher D., Montfort F., 2011. Managing the intercropping period for controlling soil borne diseases of potato due to *Streptomyces* spp. and *Rhizoctonia solani*, *EAPR*, Oulu, Finland, p 93.

Bouček-Mechiche K., 2012. Les couverts végétaux à objectif assainissant : une solution pour réduire les maladies du sol ? *Plants de Bretagne* 44, 10-12. - I-22.

Bouček-Mechiche B., Buisson C., Navier H., Mille B., Andrivon D., 2013. Identifying the key-stages of *R. solani* AG 3 epidemics: a crucial step to develop integrated control strategies. *EAPR*, Jérusalem, Israël, p 39.

Champeil A., Bouček-Mechiche K., Chatot C., Dolo P., Faloya V., Gaucher D., Mille B., Montfort F., 2012. Conception de nouveaux systèmes de culture limitant la pression de rhizoctone brun dans les rotations incluant pomme de terre, betterave et/ou maïs. *AFPP – 10ème Conférence internationale sur les maladies des plantes – 3-5 décembre 2012*.

Chung Y.R., Hoitink H.A.H., Lipps P.E., 1988. Interactions between organic-matter decomposition level and soilborne disease severity. *Agriculture, Ecosystems and Environment* 24, 183-193.

Fiers M., Edel-Hermann V., Chatot C., Le Hingrat Y., Alabouvette C., Steinberg C., 2012. Potato soil-borne diseases. A review. *Agron. Sustain. Dev* 32, 93–132 DOI 10.1007/s13593-011-0035-z

Gaucher D., Lhote J-M., Chatot C., Beauvallet G., Montfort F., Champeil A., Bouček-Mechiche K., 2012. Réduire l'impact des maladies telluriques dans les systèmes de cultures pour une protection intégrée et durable des grandes cultures (pomme de terre, betterave sucrière, maïs). *AFPP – 10ème Conférence internationale sur les maladies des plantes – 3-5 décembre 2012*.

Jacobs H., Boswell G.P., Scrimgeour C.M., Davidson F.A., Gadd G.M., Ritz K., 2004. Translocation of carbon by *Rhizoctonia solani* in nutritionally-heterogeneous microcosms. *Mycological Research* 108, 453–462.

Leclerc M., Doré T., Gilligan C.A., Lucas P., Filipe J.A.N., 2013. Host Growth Can Cause Invasive Spread of Crops by Soilborne Pathogens. *PLoS ONE* 8(5): e63003. doi:10.1371/journal.pone.0063003

Leclerc M., Doré T., Gilligan C.A., Lucas P., Filipe J.A.N., 2014. Estimating the Delay between Host Infection and Disease (Incubation Period) and Assessing Its Significance to the Epidemiology of Plant Diseases. *PLoS ONE* 9(1): e86568. doi:10.1371/journal.pone.0086568.

Leclerc M., 2013. Approche par modélisation et expérimentation du développement spatio-temporel des maladies telluriques : le cas du pathosystème betterave à sucre – *Rhizoctonia solani*. Thèse–Agrocampus Ouest

Motisi N., Poggi S., Filipe JAN, Lucas P., Doré T., Monfort F., Gilligan C.A., Bailey D.J., 2013. Epidemiological analysis of the effects of biofumigation for biological control of root rot in sugar beet. *Plant Pathology* 62, 69–78.

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(12), 2044-2057.

Motisi N., Monfort F., Faloya V., Lucas P., Doré T., 2009. Growing Brassica juncea as a cover crop, then incorporating its residues provide complementary control of *Rhizoctonia* root rot of sugar beet. Field Crops Research 113, 238–245. doi: 10.1017/s0950268807008990.

Noble R., Coventry E., 2004. Suppression of soil-borne plant diseases with composts: a review. Biocontrol Science and Technology 15, 3-20.