



UFR Sciences
2, Bd Lavoisier
49045 ANGERS Cedex 01



AGROCAMPUS OUEST
65 rue de St Brieuc, CS 84 215, BP 35042 -
RENNES Cedex

Université de Rennes I
1, 2 rue du Thabor, CS 46510 - 35065 RENNES
Cedex



**Centre Technique et
Interprofessionnel des
Fruits et Légumes**

ZI Belle Etoile-Antarès
35 allée des Sapins
44 470 Carquefou Cedex

Mémoire de Fin d'Etudes

Master 2 Sciences Technologie Santé
Mention Biologie et Technologie du Végétal
Spécialité : Production et Technologie du Végétal (ProTeV)

Parcours : I Productions Végétales Spécialisées / Option : Produits phytosanitaires, réglementation, méthodes alternatives

Année universitaire 2014-2015

**Approche intégrée de la protection des cultures maraîchères sous abris
contre les bioagresseurs telluriques**

Par : Claire TEXIER

Soutenu à Angers le 15 septembre 2015

Maître de stage : Madame Céline ADE

Enseignant référent : Monsieur Jean-Marc LABATTE



UFR Sciences
2, Bd Lavoisier
49045 ANGERS Cedex 01



AGROCAMPUS OUEST
65 rue de St Brieuc, CS 84 215, BP 35042 -
RENNES Cedex

Université de Rennes I
1, 2 rue du Thabor, CS 46510 - 35065 RENNES
Cedex



**Centre Technique et
Interprofessionnel des
Fruits et Légumes**

ZI Belle Etoile-Antarès
35 allée des Sapins
44 470 Carquefou Cedex

Mémoire de Fin d'Etudes

Master 2 Sciences Technologie Santé
Mention Biologie et Technologie du Végétal
Spécialité : Production et Technologie du Végétal (ProTeV)

Parcours : I Productions Végétales Spécialisées / Option : Produits phytosanitaires, réglementation, méthodes alternatives

Année universitaire 2014-2015

**Approche intégrée de la protection des cultures maraîchères sous abris
contre les bioagresseurs telluriques**

Par : Claire TEXIER

Soutenu à Angers le 15 septembre 2015

Maître de stage : Madame Céline ADE

Enseignant référent : Monsieur Jean-Marc LABATTE

AUTORISATION DE DIFFUSION EN LIGNE

  TUDIANT(E)

N   tudiant : 20135927

Email : texier.claire@yahoo.fr

Je soussigné(e) Claire TEXIER être l'auteur du document intitulé :

Approche intégrée de la protection des cultures maraîchères sous abris contre les bioagresseurs telluriques

préparé sous la direction de Madame Céline ADE

et soutenu le 15 septembre 2015

Je certifie la conformité de la version électronique déposée avec l'exemplaire imprimé remis au jury, certifie que les documents non libres de droits figurant dans mon mémoire seront signalés par mes soins et pourront être retirés de la version qui sera diffusée en ligne par le Service Commun de la Documentation de l'Université d'Angers. Agissant en l'absence de toute contrainte, et sachant que je dispose à tout moment d'un droit de retrait de mes travaux, j'autorise, sans limitation de temps, l'Université d'Angers à les diffuser sur internet dans les conditions suivantes :

- | |
|--|
| <input checked="" type="checkbox"/> diffusion immédiate du document en texte intégral
<input type="checkbox"/> diffusion différée du document en texte intégral ; date de mise en ligne :
<input type="checkbox"/> n'autorise pas sa diffusion dans le cadre du protocole de l'Université d'Angers |
|--|

  Angers, le 15/09/2015

Signature :



 JURY DE SOUTENANCE

- | |
|---|
| <input type="checkbox"/> Autorise la diffusion immédiate du document en texte intégral
OU
<input type="checkbox"/> Autorise la diffusion différée du document en texte intégral ; à compter du :

<input type="checkbox"/> En libre-accès OU <input type="checkbox"/> En accès restreint

<input type="checkbox"/> Sous réserve de corrections |
|---|

OU

- | |
|--|
| <input type="checkbox"/> N'autorise pas sa diffusion dans le cadre du protocole de l'Université d'Angers |
|--|

  Angers, le

Nom et Signature du maître de stage:

Nom et Signature du président de jury:

ENGAGEMENT DE NON PLAGIAT
M2 ProTeV
2014-2015

Je, soussigné (e) :
Claire TEXIER

Déclare être pleinement conscient(e) que le plagiat de documents ou d'une partie d'un document publiés sur toutes formes de support, y compris l'internet, constitue une violation des droits d'auteur ainsi qu'une fraude caractérisée.


En conséquence, je m'engage à citer toutes les sources que j'ai utilisées pour ce rapport, rédigé au cours de mon master 2 Production et Technologie du Végétal (ProTeV).

Je m'engage également à respecter les consignes données pour la rédaction de ce rapport.

A : Carquefou

Le : 21/03/15

Signature :



Remerciements

Au terme de ce travail, je tiens à remercier Madame Céline Ade pour m'avoir encadrée lors de mon stage, d'avoir répondu à mes questions, pour son aide et pour ses relectures attentives de mon rapport de stage.

Je tiens aussi à remercier vivement le chef du centre de Carquefou, Monsieur Eric Brajeul pour m'avoir permis d'effectuer mon stage au sein de son organisme.

Je remercie également Vanessa et Loïc, les techniciens, pour leurs explications, leur gentillesse et pour m'avoir appris tant de choses.

Merci à tous les stagiaires de l'équipe : Axel, Maeva et Theresa pour leur bonne humeur et leur sympathie.

Merci à l'ensemble du personnel du CTIFL de Carquefou qui a participé de près ou de loin à la bonne réalisation de mon essai et de mon stage.

Un grand MERCI à Madame Manon Lefebvre, doctorante à l'INRA d'Avignon et au CTIFL de Balandran pour avoir pris le temps de m'expliquer la méthode d'analyse spatio-temporelle de cartes ainsi qu'à toutes les personnes que j'ai pu contacter pour l'utilisation de cette méthode.

Et enfin, je remercie Monsieur Jean-Marc Labatte pour le suivi du stage ainsi que Madame Sandrine Travier pour l'encadrement tout au long de l'année de Master 2 ProTeV.

Table des matières

Remerciements	
Table des matières.....	
Glossaire	
Liste des abréviations.....	
Liste des annexes.....	
Tables des illustrations	
Approche intégrée de la protection des cultures maraîchères sous abris contre les bioagresseurs telluriques	1
1. Introduction.....	1
1.1. Le CTIFL : la structure d'accueil.	1
1.2. Enjeux et spécificités des cultures légumières	3
1.3. Contexte	3
1.3.1. Le maraîchage en Pays de Loire.....	3
1.3.2. Gestion des bioagresseurs telluriques.....	3
1.4. Problématique et objectifs fixés.....	4
1.5. Bioagresseurs et cultures sous abris : état de l'art.....	5
1.5.1. <i>Pyrenochaeta lycopersici</i>	5
1.5.2. <i>Meloidogyne</i> sp.....	6
1.6. Hypothèses	7
2. Matériel et méthodes	7
2.1. Matériel	7
2.1.1. Description du dispositif	7
2.1.1.1. Site de Carquefou	7
2.1.1.2. Site de l'APREL	8
2.2. Méthodes.....	9
2.2.1. L'expérimentation système	9
2.2.2. Les leviers dans l'expérimentation système	10
2.2.3. Evolution des symptômes causés par les bioagresseurs telluriques	15
2.2.4. Analyse spatio-temporelle complémentaire	16
3. Résultats.....	19
3.1. Evolution des symptômes causés par les bioagresseurs telluriques.....	19
3.1.1. Site de Carquefou	19
3.1.2. Site de l'APREL	19
3.2. Analyse spatio-temporelle des attaques	20
3.2.1. Site de Carquefou. Attaque de <i>Pyrenochaeta lycopersici</i> sur cultures de tomate	20
3.2.1.1. Homogénéité des cartes	20
3.2.1.2. Comparaison de cartes dans le temps.....	20
3.2.2. Site de l'APREL. Attaque de <i>Meloidogyne</i> sp sur cultures de melon et de salade	21
3.2.2.1. Homogénéité des cartes	21
3.2.2.2. Comparaison de cartes dans le temps.....	21
3.3. Synthèse des résultats.....	22
4. Discussion.....	22
4.1. Efficacité des leviers	22
4.2. Caractérisation des structures spatiales des attaques	24
5. Conclusion	25
6. Travaux complémentaires.....	26

6.1.	Agrosyst	27
6.2.	<i>Fusarium</i> /Radis	27
6.3.	<i>Thielaviopsis basicola</i> vs antagonistes.....	28
6.4.	Essai Pathosol	28
7.	Bibliographie	29
8.	Sitographie	33
Annexes		

Glossaire

Biocontrôle : C'est l'ensemble des méthodes de protection des végétaux par l'utilisation de mécanismes naturels. Les produits de biocontrôle se classent en quatre familles : les macro-organismes auxiliaires, les micro-organismes, les médiateurs chimiques, les substances naturelles.

DEPHY Ecophyto : C'est un réseau qui a pour objectif la Démonstration, l'Expérimentation et la Production de références sur les systèmes économes en pHYtosanitaires. Ce dispositif s'organise en deux réseaux distincts : un réseau de fermes de démonstration et de production de références (réseau FERME) et un réseau de stations expérimentales de recherche appliquée (réseau EXPE).

Incidence d'une maladie : Pourcentage d'individus atteints par la maladie sur une année.

Interpolation: Opération consistant à déterminer, à partir d'une série statistique succincte aux valeurs trop espacées, de nouvelles valeurs correspondant à un caractère intermédiaire pour lequel aucune mesure n'a été effectuée (d'après le Larousse).

Projet GIS PIClèg : Groupement d'Intérêt Scientifique pour la Production Intégrée en Cultures légumières. Il est né en 2007 sous le parrainage du Ministère de l'agriculture, à l'initiative des Producteurs de Légumes de France, de l'INRA et du CTIFL, avec pour ambition de mobiliser l'ensemble des acteurs de la recherche et du développement pour proposer aux producteurs de légumes des systèmes de cultures respectueux de l'environnement et économiquement performants.

Sévérité conditionnelle d'une maladie : notes moyennes de la maladie pour les individus atteints.

Système de culture : (selon Sebillotte) Ensemble des modalités techniques mises en œuvre sur des parcelles traitées de manière identique. Chaque système de culture se définit pour les cultures assolées par :

- la nature des cultures et leur ordre de succession
- les itinéraires techniques appliqués à chacune des cultures, ce qui inclut le choix des variétés.

Le concept de système de culture défini par Papy (2008) rappelle qu'il intègre l'échelle temporelle pluriannuelle et l'échelle spatiale de la parcelle et, par extension, de la sole du système de culture, ensemble des parcelles gérées de façon homogène.

Liste des abréviations

APREL : Association Provençale de Recherche et d'Expérimentation Légumière

CTIFL : Centre Technique Interprofessionnel des Fruits et Légumes

DRAAF: Direction Régionale de l'Alimentation de l'Agriculture et de la Forêt des Pays de la Loire.

GEDUBAT : innovations techniques et variétales pour une GEstion DURable des BioAgresseurs Telluriques dans les systèmes maraîchers sous abris

GIS PIClèg : Groupement d'Intérêt Scientifique pour la Production Intégrée en Culture Légumière

GRAB : Groupe de Recherche en Agriculture Biologique

IBMA : International Biocontrol Manufacturers Association

IFT : Indicateur de Fréquence de Traitement

IGR : Indice de Galle Racinaire

INR : Indice de Nécrose Racinaire

INRA : Institut National de la Recherche Agronomique

INVENIO : Centre de recherche et d'expérimentation de la filière fruits et légumes d'Aquitaine

Liste des annexes

Annexe I : PRABIOTEL : Gestion des bioagresseurs telluriques en cultures légumières

Annexe II : Sorties du logiciel R

Tables des illustrations

Figures

Figure 1: La gestion des bioagresseurs (d'après Crunelle, 2012)

Figure 2: Photographie montrant les racines d'un pied de tomate atteint par le Corky-root (à gauche) et un pied sain (à droite) (source : Céline Ade, 2012)

Figure 3: Cycle de vie de *P. lycopersici* (d'après Hasna, 2007)

Figure 4: Cycle de développement des nématodes à galles *Meloidogyne* sp (d'après Abad *et al*, 2008)

Figure 5 : Galles observées sur racines de salade (Claire Goillon, 2014)

Figure 6: Photographie des multi-chapelles (Photo personnelle, 2015)

Figure 7 : Plan du dispositif expérimental – Site de Carquefou

Figure 8: Successions culturales sur le site de l'APREL

Figure 9 : Successions culturales sur le site de Carquefou

Figure 10: Positionnement des modes d'action des leviers techniques par rapport aux trois stratégies agronomiques

Figure 11: Positionnement des modes d'action du levier "solarisation" par rapport aux trois stratégies du projet GEDUBAT

Figure 12: Echelle de Zeck : notation des indices de galles

Figure 13: Plan d'échantillonnage du site de Carquefou

Figure 14: Plan d'échantillonnage du site de l'APREL

Figure 15: Evolution des attaques de *P. lycopersici* en fonction de la modalité et de l'année - Site de Carquefou. Les barres verticales représentent l'erreur standard (moyenne de 45 répétitions pour 2012 et 60 répétitions pour 2013 et 2014). Les lettres correspondent aux groupes après l'analyse de comparaison multiple (test de Kruskal-Wallis, $\alpha = 0,05$).

Figure 16: Evolution des attaques de *Meloidogyne* sp en fonction de la modalité et de l'année - Site de l'APREL. Les barres verticales représentent l'erreur standard (moyenne de 60 répétitions). Les lettres correspondent aux groupes après analyse de comparaison multiple (test de Kruskal-Wallis, $\alpha = 0,05$).

Tableaux

Tableau I: Enjeux des cultures légumières (d'après Launais *et al*, 2014)

Tableau II: Situations-types identifiées pour la prise de décision. (IGR : Indice de Galle Racinaire)

Tableau III: Stratégies agronomiques et pratiques mises en œuvre dans chacun des systèmes sur le site de Carquefou et sur le site de l'APREL (En noir : Pratique mobilisée intrinsèquement dans le système ; en rouge : Pratique mise en œuvre si problèmes rencontrés selon indicateurs = levier)

Tableau IV: Températures létales des principaux agents pathogènes telluriques en maraîchage

Tableau V: Résultats de l'analyse du test 1 (homogénéité des parcelles) - site de Carquefou - parcelle M2O (biocontrôle)

Tableau VI: Résultats de l'analyse du test 1 (homogénéité des parcelles) - site de Carquefou - parcelle M2E (référence)

Tableau VII: Résultats de l'analyse du test 2 (évolution temporelle) - site de Carquefou - parcelle M2O (biocontrôle)

Tableau VIII: Résultats de l'analyse du test 2 (évolution temporelle) - site de Carquefou - parcelle M2E (référence)

Tableau IX: Résultats de l'analyse du test 1 (homogénéité des parcelles) - site de l'APREL - parcelle C3 (sorgho nématocide)

Tableau X: Résultats de l'analyse du test 1 (homogénéité des parcelles) - site de l'APREL - parcelle C4 (engrais vert diversifié)

Tableau XI: Résultats de l'analyse du test 1 (homogénéité des parcelles) - site de l'APREL - parcelle C5 (solarisation)

Tableau XII: Résultats de l'analyse du test 2 (évolution temporelle) - site de l'APREL - parcelle C3 (sorgho nématocide)

Tableau XIII: Résultats de l'analyse du test 2 (évolution temporelle) - site de l'APREL - parcelle C4 (engrais vert diversifié)

Tableau XIV: Résultats de l'analyse du test 2 (évolution temporelle) - site de l'APREL - parcelle C5 (solarisation)

Tableau XV: Bilan annuel des attaques de *P. lycopersici* sur le site de Carquefou

Tableau XVI: Bilan des évolutions interannuelles des attaques de *P. lycopersici* sur le site de Carquefou

Tableau XVII: Bilan annuel des attaques de *Meloidogyne* sp sur le site de l'APREL

Tableau XVIII: Bilan des évolutions interannuelles des attaques de *Meloidogyne* sp sur le site de l'APREL

Approche intégrée de la protection des cultures maraîchères sous abris contre les bioagresseurs telluriques

1. Introduction

Les cultures maraîchères sous abris sont sensibles aux ravageurs et aux maladies telluriques étant donné le microclimat favorable au développement des agents pathogènes, l'utilisation intensive des sols et le faible nombre de familles botaniques utilisées. La productivité de ces systèmes reposait jusqu'alors presque exclusivement sur la lutte chimique, mais des systèmes alternatifs doivent actuellement être trouvés pour des raisons environnementales et sociétales, ce qui inclut l'impact sur la santé humaine (Navarette *et al*, 2010).

Les risques environnementaux et sanitaires engendrés par l'utilisation des produits phytosanitaires ont fait l'objet d'une prise de conscience citoyenne et politique ces dernières années. En effet, suite au Grenelle de l'environnement en 2007, a été mis en place le plan Ecophyto. Ce plan vise à réduire progressivement l'utilisation des produits phytosanitaires en France tout en maintenant une agriculture économiquement performante. De plus, ce plan finance des essais afin d'expérimenter la mise en œuvre de pratiques innovantes et économes en intrants et d'en mesurer les effets (Abjean-Uguen, 2013). Les nouveaux grands axes du plan Ecophyto ont été présentés en janvier 2015, ce qui a amené à la publication du nouveau plan Ecophyto en juin 2015. Ce nouveau plan Ecophyto repose sur de grands principes comme le maintien du cap d'une réduction de 50% de l'utilisation des produits phytosanitaires, une vigie des impacts à 360°, une inscription au cœur du projet agro-écologique ou encore une culture positive.

L'objectif de mon stage réalisé au sein du CTIFL de Carquefou, est de contribuer à l'amélioration et au développement de systèmes de cultures innovants intégrant des pratiques culturales alternatives pour gérer les bioagresseurs telluriques des cultures légumières sous abris tout en diminuant le recours aux produits phytosanitaires de synthèse.

1.1. Le CTIFL : la structure d'accueil.

Le CTIFL de Carquefou se situe près de Nantes. Il a pour vocation d'apporter son concours technique aux producteurs de légumes du Grand Ouest et du Nord de la France en particulier, ainsi qu'aux professionnels en aval de la filière. Le centre de Carquefou est composé d'une exploitation maraîchère de 6 ha représentative des différents secteurs d'activité en serres verre, abris plastique et plein champ. Les travaux du centre de Carquefou sont consacrés à la production légumière. Les thématiques étudiées sont transverses. Elles contribuent à l'amélioration de la qualité, à la réduction des coûts et au respect de l'environnement. Le CTIFL

mène actuellement différents projets labellisés par le GIS PIClèg dont GEDUBAT, innovations techniques et variétales pour une GEstion DURable des BioAgressseurs Telluriques dans les systèmes maraîchers sous abris. Il rassemble cinq partenaires situés sur six sites :

- CTIFL : centres de Carquefou (44) et Balandran (30)
- INRA : domaine expérimental Alenya-Roussillon (66)
- INVENIO : lycée agricole de Sainte Livrade (47)
- GRAB : parcelles chez un producteur (30)
- APREL : parcelles chez un producteur (84).

Il est financé dans le cadre du réseau DEPHY Ecophyto EXPE. L'objectif principal du projet GEDUBAT est de valider l'intérêt agronomique, socio-économique et environnemental de l'utilisation de pratiques améliorantes pour la gestion des bioagresseurs telluriques (champignons et/ou nématodes à galles). A terme, le but de ce projet est entre autres de réduire l'IFT des systèmes de cultures maraîchers sous abris en diminuant ou en remplaçant les traitements de désinfection des sols par des combinaisons de pratiques alternatives (Janvier, 2012). Il permet de mettre en réseau des acteurs de la recherche, de l'expérimentation et du développement. Pour conclure, l'objectif final est de proposer aux producteurs des stratégies alternatives globales, fiables et réalistes sur le plan technico-économique.

Le projet GEDUBAT fait suite au projet Prabiotecl clôturé en 2011 après 3 années d'essais. Il avait pour but d'étudier les pratiques améliorantes pour les cultures de plein champ et sous abris. Les premiers résultats obtenus après cette étude ont montré qu'il est nécessaire d'aller plus loin. (Cf. **annexe I**). Le projet GEDUBAT a alors été créé, il est plus long et se focalise sur les cultures sous abris (Crunelle, 2012).

Les différentes missions qui m'ont été confiées lors de mon stage sont de participer à l'acquisition des données sur le site expérimental de Carquefou et de formaliser l'ensemble des opérations menées sur les systèmes testés. D'autre part, j'ai effectué l'analyse et la synthèse des données recueillies sur deux sites du projet : le CTIFL de Carquefou et l'APREL, depuis son démarrage en 2012. De plus, j'ai participé à l'amélioration continue de l'expérimentation système et à ses perspectives en étudiant la bibliographie.

Tableau I: Enjeux des cultures légumières (d'après Launais *et al*, 2014)

Enjeux économiques	Nécessité que le producteur ait un revenu acceptable et que les systèmes français restent compétitifs aux niveaux européen et mondial. En effet, l'usage des produits phytosanitaires permet d'assurer un certain niveau de rendement en protégeant les cultures contre les attaques de bioagresseurs (Launais <i>et al</i> , 2014).
Enjeux qualitatifs & sanitaires	La réglementation définit la qualité sanitaire des produits (Limite Maximale de Résidus pour chaque espèce légumière et absence d'agent pathogène pour l'homme) (règlement (CE) n° 396/2005).
Enjeux réglementaires	Ils proviennent du plan Ecophyto issu de la directive européenne 2009/128/CEE. De plus, il y a un retrait du marché des matières actives préoccupantes. Enfin, la directive cadre sur l'eau (DCE) : 2000/60/CEE, impose d'atteindre un « bon état écologique et chimique » des masses d'eau d'ici 2015.
Enjeux concernant la durabilité de la protection chimique	Les agriculteurs disposent d'une gamme étroite de produits phytopharmaceutiques et certains peuvent manquer d'efficacité. De plus, des résistances vis-à-vis de certains produits peuvent apparaître. Il est donc nécessaire de bien gérer les produits phytopharmaceutiques (Volay, 2009).
Enjeux environnementaux	Les surfaces légumières ne représentent que 1% de la Surface Agricole Utile Française et sont souvent concentrées dans des bassins de production sensibles (Serrurier, 2013).
Enjeux sur la santé humaine	Des risques pour la santé de l'applicateur sont possibles s'il n'est pas assez protégé lors des applications. Il peut aussi y avoir des risques pour la santé du consommateur (Bonnefoy, 2012).

1.2. Enjeux et spécificités des cultures légumières

La production de légumes recouvre trois secteurs : le maraîchage, la culture de plein champ et les jardins familiaux (Mazoyer *et al*, 2002). Les cultures légumières et leur production sont très diversifiées en France et représentent environ 35 espèces cultivées (Les cahiers de FranceAgrimer, 2013).

Ce sont les différentes conduites culturales, les zones de culture ainsi que la grande variabilité des espèces cultivées et leurs problèmes sanitaires qui entraînent la grande diversité des systèmes maraîchers en France. De plus, une des caractéristiques des cultures légumières est l'utilisation habituelle, dans la mesure du possible, de certaines méthodes alternatives aux produits phytosanitaires telles que l'utilisation de variétés résistantes, le paillage plastique ou encore la désinfection du sol par solarisation ; ceci puisqu'il existe une indisponibilité de produits phytosanitaires contre certains bioagresseurs. Ces impasses techniques ont abouti au développement de méthodes alternatives (Volay, 2009).

Ces spécificités des productions légumières entraînent des enjeux particuliers auxquels les producteurs doivent faire face (Launais *et al*, 2014). Ils sont répertoriés dans le **tableau I**.

1.3. Contexte

1.3.1. Le maraîchage en Pays de Loire

Les Pays de la Loire et en particulier le Bassin Nantais accueillent plus de 700 exploitations légumières (AGRESTE, 2013). Le maraîchage représentait 20% du chiffre d'affaires agricole du département en 2012 (De Werbier, 2012). Le département de la Loire-Atlantique est le leader sur le marché français pour au moins cinq produits : mâche, poireau primeur, concombre et radis (Chambre d'agriculture de Loire-Atlantique). Les productions sont réalisées sous serre, en plein champ ou sous abris froids.

Dans le département de la Loire-Atlantique, la culture de mâche représente 79% de la production nationale et 50% de la production européenne avec 33 676 tonnes de produites en 2014. La production de poireau primeur représente 12% de la production nationale, le concombre se situe à 16% et le radis à 17% (AGRESTE, 2014).

1.3.2. Gestion des bioagresseurs telluriques

1.3.2.1. Généralités

Actuellement, les moyens de lutte directe via l'utilisation de produits phytosanitaires actifs contre les bioagresseurs telluriques sont peu nombreux et leur efficacité est limitée. En effet, l'utilisation du Bromure de méthyl a été interdite depuis mars 2010 en traitement du sol contre les champignons (Règlement Européen CE n° 1005/2009). Ce produit à large spectre permettait de se débarrasser de la quasi-totalité des organismes nuisibles dans le sol tels que champignons,

SCHÉMA PRODUCTION INTÉGRÉE

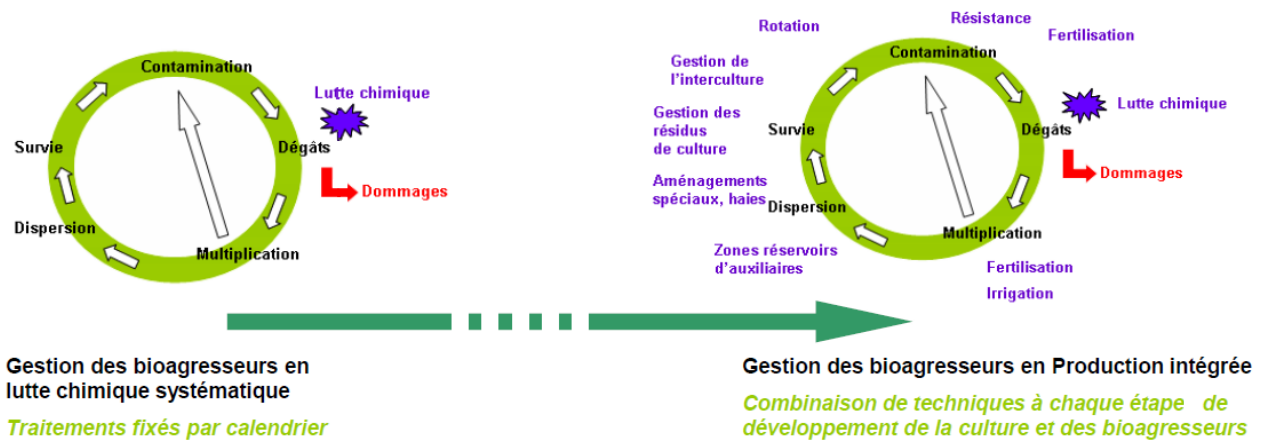


Figure 1: La gestion des bioagresseurs (d'après Crunelle, 2012)

bactéries, insectes, nématodes et mauvaises herbes (Michel *et al*, 2007). De plus, un autre fumigant, le Métam-sodium a subi une restriction d'usage effective en 2015 (règlement d'approbation n°359/2012) pour la mâche. Il permet d'éliminer une grande partie des maladies et des adventices du sol. Le produit est toujours homologué pour certaines productions légumières mais à des doses plus restreintes (DDTM 44, 2013).

1.3.2.2. La production intégrée

La production intégrée (**figure 1**) s'appuie sur une approche globale des cultures légumières où l'agronomie est au centre des pratiques. De plus, afin de limiter les intrants extérieurs, la production intégrée s'appuie sur les équilibres naturels, les agrosystèmes sont gérés dans leur ensemble. C'est l'adoption d'une approche système sur une échelle pluriannuelle qui garantit la durabilité de la démarche (Crunelle, 2012).

D'une autre manière, la production intégrée est l'application rationnelle d'une combinaison de lutttes biologiques, chimiques, physiques, culturelles ou génétiques. L'emploi des préparations phytopharmaceutiques y est limité au strict nécessaire pour maintenir les populations d'organismes nuisibles en-dessous du seuil à partir duquel apparaissent une perte ou des dommages économiquement inacceptables (Launais *et al*, 2014).

1.4. Problématique et objectifs fixés

Les systèmes maraîchers sous abris en France s'appuient principalement sur des rotations assez intensives de cultures. On trouve fréquemment 1 à 2 cultures courtes en période hivernale (ex : laitues, radis, mâche, primeurs...), suivies dès la mi-mars de légumes-fruits : selon les rotations pratiquées, de solanacées (ex : tomate, poivron et aubergine) ou de cucurbitacées (ex : melon, concombre et courgette) en été (Collange, 2011). L'utilisation intensive des sols, sous un microclimat biologiquement favorable, ainsi qu'un faible nombre de familles botaniques entraînent une augmentation des problèmes liés aux bioagresseurs telluriques, que ce soit des nématodes ou des champignons, qui peuvent souvent se maintenir plusieurs années dans les sols. Jusqu'à maintenant, les bioagresseurs telluriques induits par ces systèmes très intensifs pouvaient être masqués, ou seulement limités par l'usage de produits phytosanitaires, que ce soit en désinfection ou traitements des sols, ou en application en cours de végétation. Mais ces problèmes se révèlent aujourd'hui largement, conduisant à une fragilisation des exploitations maraîchères sous abris. Il existe des pratiques dites alternatives ou améliorantes, dont la solarisation, la biofumigation, l'utilisation d'engrais verts en intercultures, l'utilisation de lignées partiellement résistantes ou non hôtes... Elles sont étudiées et pour certaines déjà utilisées par les producteurs (Chellemi, 2002). Cependant, la validation de leur intérêt dans les différents systèmes de culture, sur plusieurs bioagresseurs et à long-terme, leur évaluation technico-économique, la mise au point d'itinéraires techniques spécifiques à ces pratiques restent des enjeux importants avant leur plus large diffusion auprès des producteurs. Dans le cadre de mon



Figure 2: Photographie montrant les racines d'un pied de tomate atteint par le Corky-root (à gauche) et un pied sain (à droite) (source : Céline Ade, 2012)

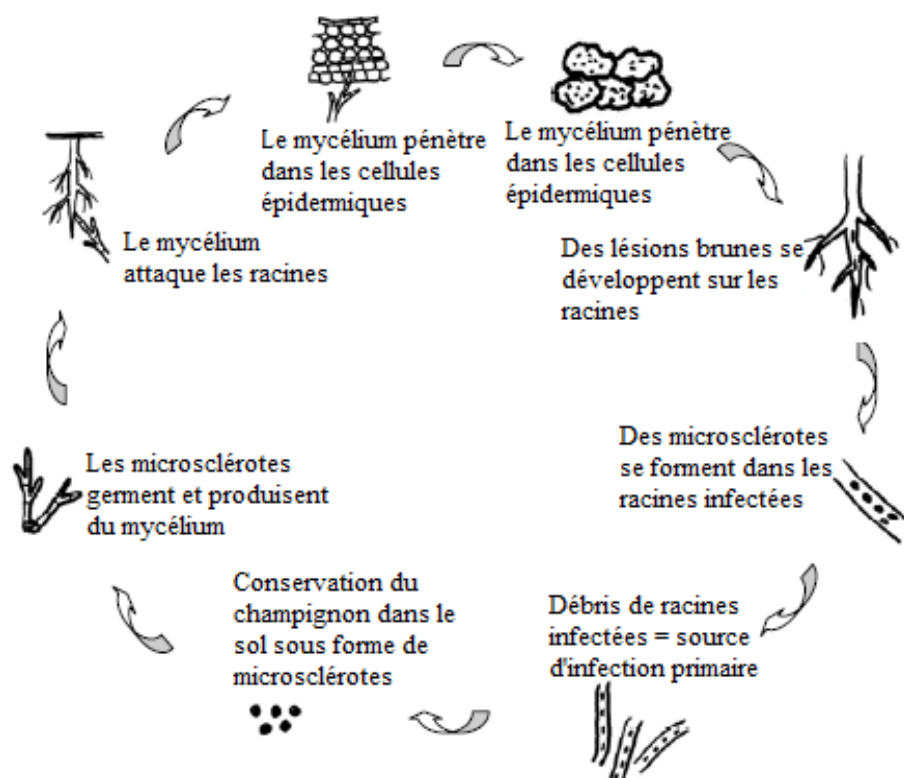


Figure 3: Cycle de vie de *P. lycopersici* (d'après Hasna, 2007)

stage, j'ai contribué à évaluer techniquement les systèmes de culture des sites de Carquefou et de l'APREL.

1.5. Bioagresseurs et cultures sous abris : état de l'art

Depuis quelques années, les bioagresseurs telluriques posent de réelles difficultés pour les producteurs maraîchers. On retrouve, entre autres, des nématodes à galles (*Meloidogyne* spp), des champignons du collet (*Sclerotini* sp., *Rhizoctonia solani*, *Botrytis cinerea*), des bactéries (*Pseudomonas* spp...) ainsi que des maladies vasculaires (*Fusarium* spp) (Collange, 2011).

Ci-dessous, la présentation de *Pyrenochaeta lycopersici*, le bioagresseur tellurique, présent sur la culture de tomate sous abri froid pendant la période de mon stage au centre de Carquefou. De plus, le nématode *Meloidogyne* sp sera présenté car nous allons aussi effectuer notre étude sur le site de l'APREL.

1.5.1. *Pyrenochaeta lycopersici*

Pyrenochaeta lycopersici est un champignon phytopathogène tellurique. Il a été isolé pour la première fois en 1929 mais était connu sous le nom de champignon stérile gris (Grey Sterile Fungus). Il a depuis été identifié comme *P. lycopersici* en 1966 (Schneider and Gerlach, 1966). Il cause la maladie de Corky-root et c'est l'un des agents pathogènes fongiques telluriques les plus importants. Il se développe à la fois dans les sols cultivés et non cultivés, causant des maladies dans différentes cultures. Il pose de nombreux problèmes dans des conditions de plantations précoces en conditions fraîches puisque le développement optimal de la maladie se situe entre 15,5 et 20°C (Fiume et Fiume, 2008). Ces conditions sont rencontrées sur le site de Carquefou.

La maladie du Corky-root est considérée comme un réel obstacle pour la production de tomate dans de nombreuses zones de production où les tomates sont cultivées en plein champ. Une des caractéristiques de la maladie est que les symptômes sont à peine perceptibles jusqu'à ce que les racines soient exposées à l'exception d'une diminution de rendement en fruits et de la croissance des pousses (Fiume et Fiume, 2008). Il attaque le système racinaire des plantes infectées. Il provoque alors des pourritures sur les petites racines, des lésions de couleur brune sur les racines de taille moyenne et enfin des lésions liégeuses sur les racines de grande taille comme illustré sur la **figure 2** (Golzar, 2009). Ce champignon affecte l'absorption des nutriments et conduit à l'endommagement du système racinaire (Goodenough et Maw, 1973). La concentration en azote dans les tissus de la plante et la concentration en nitrate du sol sont positivement corrélées avec le taux de sévérité de la maladie, tandis que le potentiel de minéralisation azotée est négativement associé avec la sévérité de la maladie (Workneh *et al*, 1993).

L'agent pathogène survit dans le sol grâce à des microsclérotés (de taille d'environ 63,5 x 44,8 µm) qui se sont formées à la surface des racines ou sous forme de mycélium dans les résidus de racines infectées (voir **figure 3**).

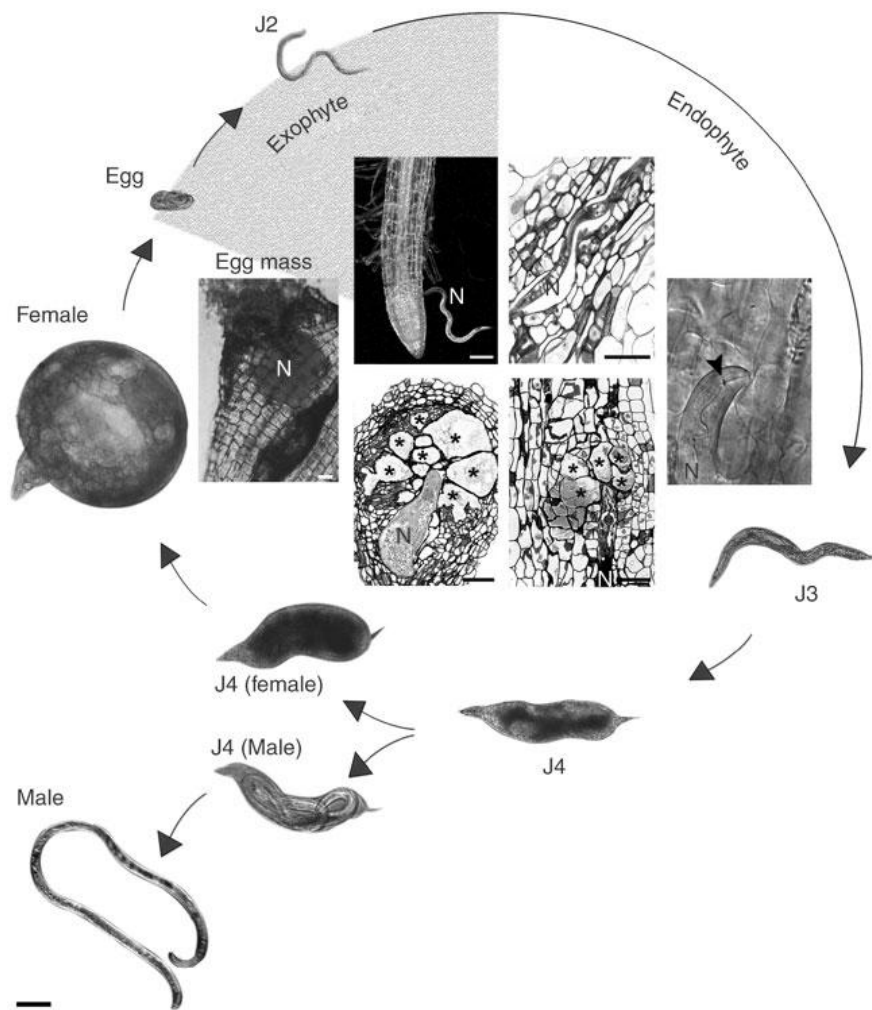


Figure 4: Cycle de développement des nématodes à galles *Meloidogyne* sp (d'après Abad *et al*, 2008)



Figure 5 : Galles observées sur racines de salade (Claire Goillon, 2014)

Les microsclérotes peuvent rester viables plus de cinq ans tout en conservant un haut pouvoir germinatif (White et Scott, 1972). Beaucoup de genres et d'espèces dans les familles des solanacées et cucurbitacées ont été signalés comme sensibles à *P. lycopersici* : poivron, aubergine, concombre, melon ; ces différents hôtes vont contribuer à l'augmentation de l'inoculum dans le sol (Grove et Campbell, 1987).

1.5.2. *Meloidogyne* sp

Meloidogyne sp est un nématode à galles, il s'agit d'un parasite majeur des racines des plantes. Il existe plusieurs espèces de *Meloidogyne* qui sévissent sur plusieurs espèces végétales et ce, dans plusieurs pays (Blancard *et al*, 2003).

Le développement des nématodes dans le sol est dépendant de son humidité, de son aération ainsi que de sa température. En effet, un film d'eau est nécessaire pour que les larves et les adultes puissent se déplacer grâce à leurs mouvements ondulatoires. La dissémination peut s'effectuer par les outils agricoles souillés, par l'eau de drainage et d'irrigation ou même à la suite d'éclaboussures (Blancard *et al*, 2003).

On rencontre communément dans le sol les œufs, ainsi que les juvéniles. En effet leur cycle de vie se déroule en deux phases (voir **figure 4**). Durant la phase exophyte, les œufs sont émis hors des racines puis, la larve (stade J2) est libre dans le sol et va envahir des racines. Ensuite, vient une phase endophyte qui est une phase d'élaboration d'un site nourricier au niveau du cylindre central de la racine. Un cycle de vie peut se dérouler en six à huit semaines et est composé de six stades : stade œuf, quatre stades juvéniles et un stade adulte (Djian-Caporalino *et al*, 2009).

Les œufs peuvent se conserver dans le sol pendant plusieurs années (jusqu'à 5-6 ans) sous la forme de masses d'œufs protégés par une gangue mucilagineuse de couleur blanche à brune (Blancard *et al*, 2003 ; Djian-Caporalino *et al*, 2009). Certaines espèces de nématodes peuvent se maintenir dans des sols qui gèlent. Leur activité est fortement réduite, voire stoppée au-dessous de 5°C et au-dessus de 38°C (Blancard *et al*, 2003).

On observe sur les racines des galles plus ou moins grosses (fonction de l'espèce) et régulières caractéristiques de la présence des nématodes (**figure 5**). Ces dommages vont perturber le développement des végétaux, ce qui va entraîner une croissance réduite. De plus, des feuilles peuvent être chlorotiques et flétries aux heures les plus chaudes de la journée (Blancard *et al*, 2003).

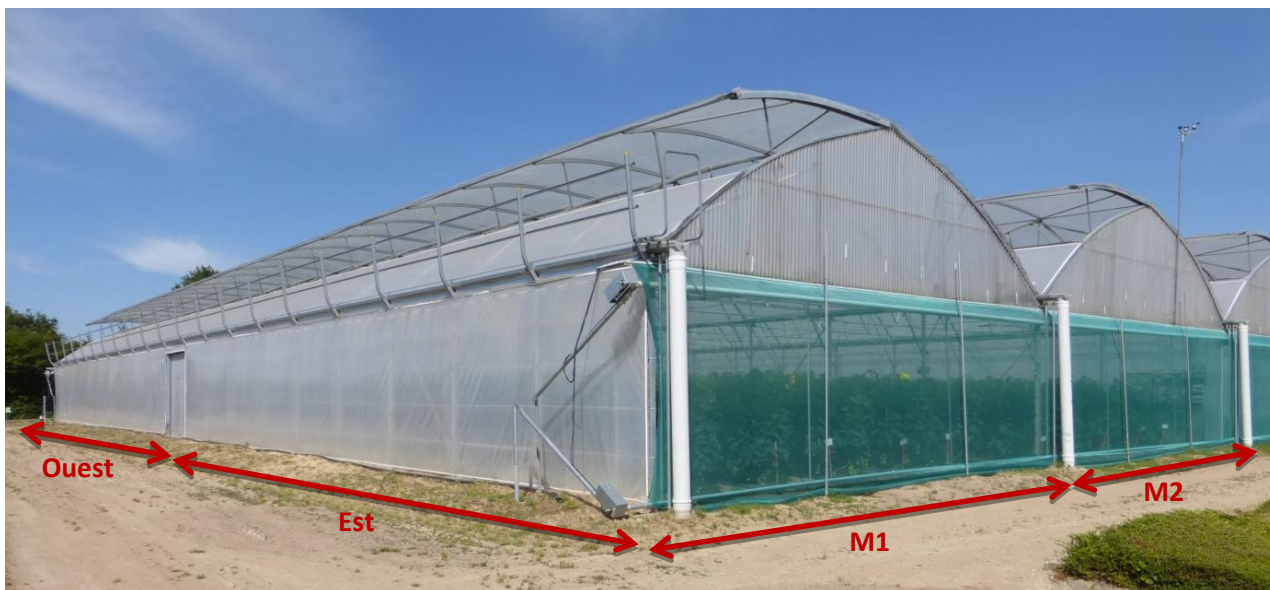


Figure 6: Photographie des multi-chapelles (Photo personnelle, 2015)

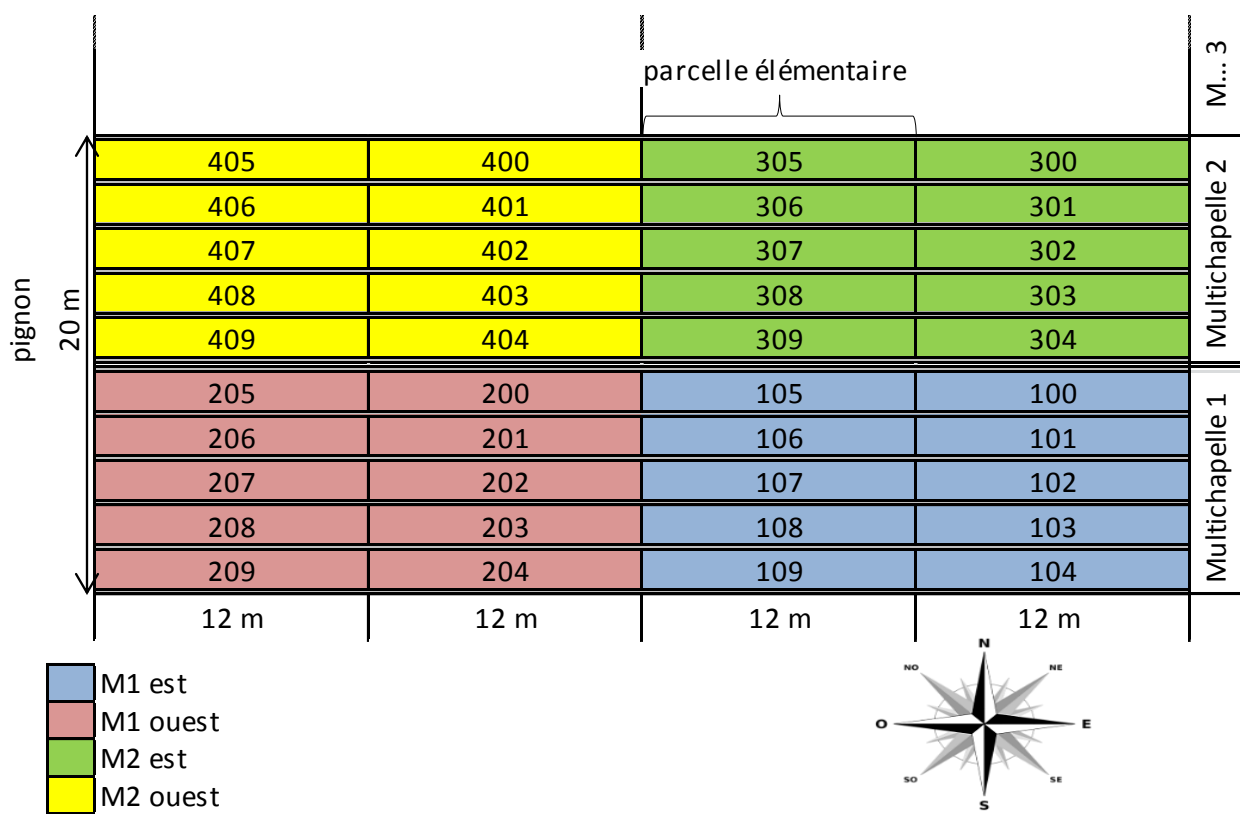


Figure 7 : Plan du dispositif expérimental – Site de Carquefou

1.6. Hypothèses

Différentes hypothèses ont été émises lors de l'élaboration du projet GEDUBAT. Nous développerons ici celles qui sont étudiées sur le site du CTIFL de Carquefou et sur le site de l'APREL. La gestion des bioagresseurs telluriques (champignons et/ou nématodes) serait possible à long terme grâce à :

- a) L'utilisation du greffage.

Cette stratégie est employée dans la modalité M2 Est (référence) du site de Carquefou.

- b) L'emploi de moyens de biocontrôle combiné ou non à des engrais verts et à des plantes assainissantes.

Cette hypothèse est étudiée dans les modalités M2 Ouest (biocontrôle) du site de Carquefou, C3 (sorgho-nématicide) et C4 (engrais vert diversifié) du site de l'APREL.

- c) L'apport de matière organique combiné ou non à la diversification des cultures.

Ces stratégies sont employées dans les modalités M1 Est (diversification), M1 Ouest (apport de matière organique) du site de Carquefou.

- d) La pratique de la solarisation systématique après chaque culture d'été.

Cette pratique est employée dans la modalité C5 (solarisation) du site de l'APREL.

2. Matériel et méthodes

2.1. Matériel

2.1.1. Description du dispositif

2.1.1.1. Site de Carquefou

Sur le site de Carquefou, quatre systèmes de culture sont étudiés et répartis dans deux multi-chapelles de 400 m² chacune (voir la **figure 6**). On peut voir le plan du dispositif expérimental sur la **figure 7**.

La multi-chapelle M1 est orientée sur des pratiques améliorantes et sur la diversification de cultures d'été. Elle suit des « stratégies risquées », et est constituée de deux systèmes :

- M1 Ouest : basé sur le maintien de l'activité biologique du sol avec apport de matière organique et d'engrais vert.
- M1 Est : basé sur le maintien de l'activité biologique du sol avec diversification des cultures d'hiver ainsi qu'un apport de matière organique et d'engrais vert.

	2012			2013			2014			2015		
	Printemps	Eté	Automne	Hiver	Printemps	Eté	Hiver	Printemps	Eté	Automne	Hiver	Printemps
Modalités et tunnels	M1 Ouest : Apport de Matière Organique	Salade	Tomate greffée (+sorgho)	Radis	Tomate greffée	Radis	Salade	Engrais organique : fumier	Courgette	Engrais Vert : sorgho	Radis	Engrais organique : fumier
	M1 Est : Diversification			Epinaud			Mâche				Epinaud	
	M2 Ouest : Biocontrôle	Salade	Tomate non greffée (+sorgho)	Radis	Tomate non greffée		Salade	Tomate greffée		Radis	Radis	Tomate greffée
	M2 Est : Référence											

Figure 9 : Successions culturales sur le site de Carquefou

	Années		2012					2013					2014					2015															
	A	M	J	J	A	S	O	N	D	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D
Modalités et tunnels	C3: "sorgho-nématique"	Melon	EV	Sol°		Salade	Melon + Biocontrôle	EV	Salade + Biocontrôle	Melon + Biocontrôle	EV	Sol°		Salade	Melon + Biocontrôle	EV	Sol°		Salade	Melon + Biocontrôle	EV	Sol°		Salade	Melon + Biocontrôle	EV	Sol°		Salade	Melon + Biocontrôle	EV	Sol°	
	C4: "engrais vert diversifié"	Melon	EV	Sol°		Salade	Melon + Biocontrôle	EV	Salade + Biocontrôle	Melon + Biocontrôle	EV	Sol°		Salade	Melon + Biocontrôle	EV	Sol°		Salade	Melon + Biocontrôle	EV	Sol°		Salade	Melon + Biocontrôle	EV	Sol°		Salade	Melon + Biocontrôle	EV	Sol°	
	C5: "solarisation"	Melon		Sol°		Salade	Melon	Sol°	Salade	Melon	Sol°	Salade	Melon	Sol°	Salade	Melon	Sol°	Salade	Melon	Sol°	Salade	Melon	Sol°	Salade	Melon	Sol°	Salade	Melon	Sol°	Salade	Melon	Sol°	

Figure 8: Successions culturales sur le site de l'APREL

EV : Engrais Vert

Sol° : Solarisation

La multi-chapelle M2 est un système monotone « radis-tomate ». Elle suit des « stratégies sécurisantes » :

- M2 Ouest : basé sur la stimulation de la plante cultivée avec l'utilisation de produits de biocontrôle.
- M2 Est : système de référence sans stratégie particulière (autre que le greffage).

Les deux multi-chapelles contiennent chacune 5 planches et sont divisées dans le sens de la largeur. Chaque sous-modalité est donc aussi constituée de 5 planches.

Les successions culturales de chaque parcelle en fonction des différentes années durant lesquelles se déroulent le projet sont présentées en **figure 9**. Nous étudierons ici les attaques de *Pyrenochaeta lycopersici* sur culture de tomate.

2.1.1.2. Site de l'APREL

Sur le site de l'APREL, trois systèmes de culture sont étudiés et répartis sur trois chapelles de 352 m² :

- Modalité C3 : « sorgho nématocide » : ce sorgho nématocide est utilisé systématiquement après la culture du melon. Il possède de hautes teneurs en dhurrine (composé toxique qui se dégrade en HCN lorsque le sorgho est broyé). Cette molécule devrait permettre de réduire les populations de nématodes dans le sol après incorporation. De plus, le sorgho est utilisé pour ses propriétés d'engrais vert et d'entretien du sol. Enfin, des agents de biocontrôle sont utilisés pour compléter l'action du sorgho. La solarisation peut être employée en cas de forte population de nématodes.
- Modalité C4 : « engrais vert diversifié ». Le système est proche de C3 mais l'engrais vert est diversifié et peut ou non avoir des propriétés de biofumigation. L'engrais vert joue « seulement » sur la structure du sol, la production de biomasse, la rupture du cycle des bioagresseurs... La solarisation peut y être employée en cas de forte population de nématodes.
- Modalité C5 : « solarisation ». La technique de la solarisation est systématiquement employée après chaque culture de melon, c'est le moyen utilisé pour éradiquer les nématodes.

Les successions culturales sur ce site sont détaillées en **figure 8**, il y a alternance entre le melon et la salade. Ces deux cultures sont sensibles aux nématodes ; néanmoins, la salade est moins sensible aux nématodes que le melon en raison de sa période de culture (Védie, 2012)

Tableau II: Situations-types identifiées pour la prise de décision. (IGR : Indice de Galle Racinaire)

Situations types	1	2a	2b	3a	3b	3c
Présence de plantes très touchées (IGR >6)	Non	Oui	Oui	Oui	Oui	Oui
% plantes touchées	faible	faible	faible	10-20%	10-20%	10-20%
Evolution de l'IGR _{moyen} de ± 2 pts	=	=	↗	=	↗	↘

Tableau III: Stratégies agronomiques et pratiques mises en œuvre dans chacun des systèmes sur le site de Carquefou et sur le site de l'APREL (En noir : Pratique mobilisée intrinsèquement dans le système ; en rouge : Pratique mise en œuvre si problèmes rencontrés selon indicateurs = levier)

		CTIFL de Carquefou				Site de L'Aprel		
Parcelles		M1O	M1E	M2O	M2E	C3	C4	C5
Modalités		Apport de matière organique	Diversification	Biocontrôle	Référence	Sorgho nématocide	Engrais vert diversifié	Solarisation
Stratégies	Augmenter l'activité biologique du sol	- Engrais verts - Apport de MO	- Engrais verts - Apport de matière organique - Biofumigation			- Biofumigation avec sorgho nématocide	- Engrais verts diversifiés	
	Freiner l'infestation et le développement de l'inoculum	- Solarisation	- Diversification en hiver - Biofumigation - Solarisation - Diversification en été	- Apport d'agent de biocontrôle - Utilisation de SDP - Solarisation - Désinfection du sol	- Désinfection du sol	- Retrait des racines - Agents de biocontrôle - Solarisation	- Retrait des racines - Agent de biocontrôle - Solarisation	- Retrait des racines - Solarisation chaque année
	Stimuler le développement de la plante cultivée	- Greffage	- Greffage	- Apport d'agent de biocontrôle - Greffage	- Greffage	- Greffage - Utilisation de SDP	- Greffage - Utilisation de SDP	- Greffage

2.2. Méthodes

2.2.1. L'expérimentation système

Face aux nouveaux enjeux de l'agriculture et aux objectifs de développement durable, les différents acteurs de la filière de la production du végétal sont de plus en plus mobilisés autour de la conception et de l'évaluation des systèmes de culture. Ces systèmes agricoles innovants doivent répondre à de nombreux critères environnementaux : diminution des intrants, préservation de l'eau, du sol, réduction des gaz à effet de serre... mais aussi économiques et sociaux : impact sur l'organisation du travail. Dans l'approche expérimentale système de culture, l'objectif n'est pas d'évaluer l'effet d'un facteur, mais de tester une combinaison de techniques mises en œuvre, et donc leur interaction à l'échelle annuelle ou pluriannuelle (Deytieux *et al*, 2012). De plus, l'expérimentation système s'appuie largement sur la modélisation (Mollier, 2014).

D'après Nolot et Debaeke en 2003, le système de culture peut être vu comme le résultat de l'application d'un corps de règles de décision sur une surface agricole, dans le cadre contraint des ressources de l'exploitation. Les règles de décision représentent le modèle d'action du producteur pour la conduite de sa culture.

Ici, sur chacun des sites, différentes règles de décision sont établies. Elles permettent, en fonction de chaque modalité, sur chacun des sites, de pouvoir établir et fixer l'ensemble des stratégies mises en place. Ces règles de décision sont établies pour les bioagresseurs telluriques dont la gestion est l'objet de ce projet. Nous allons étudier les différentes règles de décision pour le site de Carquefou. Pour rappel, les modalités dans les parcelles se situant dans la multi-chapelle 1 sont des stratégies dites « risquées » et celles dans la multi-chapelle 2 sont des stratégies dites « sécurisantes ». Dans le cas des stratégies « risquées », il n'y a pas de possibilité d'agir sur l'inoculum par une désinfection du sol. Le **tableau II** représente différentes situations types identifiées pour la prise de décision pour l'ensemble des sites d'expérimentation de GEDUBAT. Sur le **tableau III**, nous pouvons voir en noir les pratiques mises en œuvre dans chaque modalité et en rouge les leviers mis en place en cas de problèmes rencontrés selon les indicateurs du **tableau II**. Dans le cas du site de Carquefou, l'IGR est toujours faible (inférieur ou égal à 4) puisqu'il n'y a pas présence de nématodes dans les multichapelles. Les INR élevés sont dûs notamment en été, à la présence d'un agent pathogène : *Pyrenochaeta lycopersici*, tandis que durant l'hiver, ils sont liés à *Rhizoctonia solani*, *Botrytis cinerea* et *Sclerotinia* spp.

Pour le site de Carquefou, dans les systèmes M1 Ouest « Apport de matière organique » et M1 Est « diversification », le très bon état sanitaire des cultures de tomate au niveau des bioagresseurs telluriques en 2013 a permis de ne pas mobiliser de règles de décision en 2014. Par contre, dans les systèmes M2 Ouest « Biocontrôle » et M2 Est « Référence », la dégradation des racines des tomates d'été 2013 a déclenché l'utilisation du greffage en 2014. Concernant les

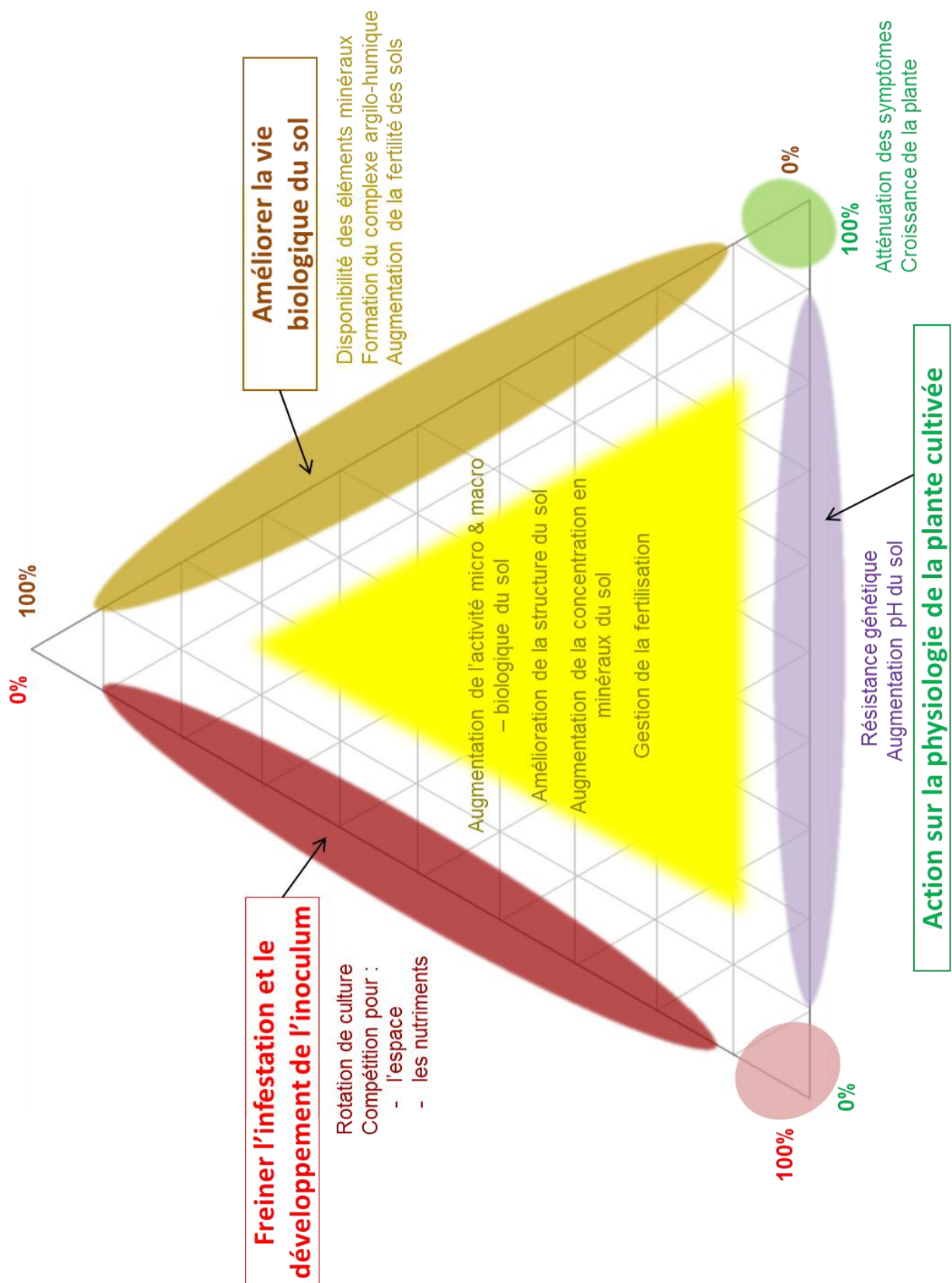


Figure 10: Positionnement des modes d'action des leviers techniques par rapport aux trois stratégies agronomiques

cultures d'été 2014, le pourcentage de plantes touchées reste faible en M1 Ouest (« Apport de matière organique ») et M1 Est (« diversification »). En M2 Ouest (« Biocontrôle ») et M2 Est (« Référence »), un inoculum de Corky-root se maintient mais est stabilisé pour le moment. Il n'y a donc pas de règle de décision enclenchée pour la prochaine campagne 2014-15. Le greffage sera tout de même maintenu dans la multi-chapelle 2.

Pour le site de l'APREL, l'infestation est telle que tous les leviers sont utilisés de manière systématique afin d'essayer de contrôler l'infestation.

Nous allons voir dans la partie suivante les différents leviers utilisés dans ces règles de décision.

2.2.2. Les leviers dans l'expérimentation système

Les différents systèmes de cultures du projet GEDUBAT sont positionnés selon trois stratégies. Il s'agit de i) l'amélioration de la vie biologique du sol afin de réduire le potentiel infectieux du sol et l'infestation des cultures, ii) de freiner l'infestation et le développement de l'inoculum tellurique par des leviers techniques ou agronomiques plus ou moins ponctuels et enfin iii) d'agir sur la physiologie de la plante cultivée par l'amélioration de sa vigueur ou l'activation des défenses pour réduire l'incidence des bioagresseurs. La mise en place de ces trois stratégies agronomiques repose sur l'utilisation de différents leviers qui ne sont pas tous utilisés en fonction des différents sites d'expérimentation. En effet, ce choix dépend du climat, des espèces végétales implantées, des bioagresseurs présents, des contraintes technico-économiques (circuit de commercialisation, ampleur de l'exploitation...), ... Nous allons présenter dans cette partie les leviers utilisés dans la globalité du projet. Il s'agit d'une liste non-exhaustive de leviers pouvant être utilisés dans la gestion des bioagresseurs telluriques.

Sur la **figure 10** est représenté un triangle avec les différents modes d'action des leviers utilisés en fonction des stratégies du projet GEDUBAT. Les modes d'action sont représentés en zones car il est impossible de pondérer précisément l'action des leviers sur le sol, les agents pathogènes ou la plante cultivée.

- La Matière Organique (MO) : l'apport de matière organique dans le sol a différentes actions. En effet, elle possède une fonction essentielle dans la disponibilité et la mobilité de nombreux constituants. De plus, elle tient un rôle principal dans l'activité micro et macro-biologique d'un milieu : ce sont les micro-organismes qui décomposent les composés organiques dissous et/ou particuliers. Le produit de cette décomposition compose pour l'ensemble du monde vivant la matière première nécessaire à l'élaboration de nouveaux éléments biologiques (Labanowski, 2004). Pour conclure, la matière organique a différents rôles : biologique en nourrissant tous les êtres vivants du sol, chimique en s'associant aux éléments minéraux pour former le complexe argilo-humique et enfin physique en créant des liaisons chimiques avec les argiles, elle améliore la

structure du sol (Goma-Fortin, 2009).

De plus, la matière organique renforce la concurrence et l'antagonisme par le biote du sol en association avec l'augmentation de l'activité microbienne. Elle induit aussi une résistance aux agents pathogènes dans les racines à partir de composés issus de la matière organique, ainsi que la libération de composés antimicrobiens résultant de l'incorporation d'engrais verts du genre *Brassica* (Giotis *et al*, 2009).

Enfin, un sol bien pourvu en matières organiques est moins favorable au développement et à la propagation des bioagresseurs telluriques (Bailey and Lazarovits, 2003).

- Les engrais verts : ils sont cultivés puis incorporés dans le sol. Ils maintiennent ou augmentent la fertilité des sols, protègent et améliorent la structure, stimulent l'activité biologique et vont permettre une meilleure disponibilité des éléments fertilisants pour la culture suivante (Leplatois Védie, 2005). En effet, les engrais verts vont apporter au sol de la matière organique qui va rapidement se dégrader. Les engrais verts à base de légumineuses ou de crucifères vont enrichir le sol en azote (Mazollier, 2009). Les engrais verts peuvent aussi « casser » le cycle de certaines maladies ou ravageurs (Leplatois Védie, 2005).
- La biofumigation : cela consiste à cultiver, puis broyer et enfouir à un certain stade certaines Brassicacées, Astéracées ou encore Alliées (dites des plantes assainissantes) qui ont une haute teneur en composés toxiques pour les microorganismes. Dans le cas de la culture de Brassicacées, il s'agit des glucosinolates qui sont précurseurs d'isothiocyanates toxiques (Réau *et al*, 2005 ; Delamarre, 2011). La biofumigation peut permettre de réduire les problèmes de bioagresseurs telluriques tels que les nématodes, champignons, adventices ou bactéries. Cet apport en matière organique permet donc la réduction de la maladie et augmente significativement les rendements (Giotis *et al*, 2009).
- La diversification des espèces cultivées : elle permet d'un point de vue agronomique la mise en place de rotations et d'associations de cultures pouvant lutter contre les agents pathogènes telluriques et aériens. D'autre part, économiquement, elle permet une sécurité au niveau des revenus qui sont répartis sur plusieurs espèces et saisons si la filière est développée pour écouler les produits (Marguerie, 2011). De plus, la rotation avec des plantes non hôtes permet de réduire les populations d'agents pathogènes (Kurle *et al*, 2001).
- Les plantes pièges : dans les rotations, l'introduction de plantes pièges permet d'améliorer l'état sanitaire du sol en réduisant le taux d'infestation de l'agent pathogène (Védie *et al*, 2009). Celles-ci sont principalement utilisées dans la lutte contre les nématodes. Tout d'abord, elles peuvent être sensibles à l'agent pathogène, c'est-à-dire que la culture sera détruite avant la fin du cycle de développement de l'agent pathogène.

Ensuite, il existe des plantes pièges mauvais-hôtes, elles vont attirer les bioagresseurs, mais vont les empêcher de finir leur cycle, soit en les empoisonnant, soit en ne leur fournissant pas les éléments indispensables au développement des femelles. Enfin, des variétés d'une espèce qui est normalement sensible aux nématodes vont attirer les nématodes dans les couches profondes grâce à leurs exsudats racinaires, puis les bloquer à l'intérieur de la racine par une réaction d'hypersensibilité (cela entraîne la mort rapide et localisée des cellules végétales autour du nématode) (Djian-Caporalino *et al*, 2009).

- La mycorhization : c'est l'association symbiotique entre un champignon (en général un septomycète) et les racines de la plante (Boullard, 1997). La protection contre les maladies est une réalité établie, mais non une règle générale. En effet, la protection contre certaines maladies est une aptitude propre à la mycorhize. Certaines maladies telluriques voient leur gravité atténuée sous l'effet de mycorhize (Perrin, 1985). Des produits de biocontrôle destinés aux cultures maraîchères existent actuellement sur le marché en tant que matières fertilisantes.
- La tolérance génétique : la sélection de variétés résistantes pour limiter les maladies est un moyen très efficace et un atout pour minimiser les interventions phytopharmaceutiques (Bernard, 2013). Dans de nombreux cas, la résistance aux maladies telluriques est basée sur des gènes uniques souvent contournée par l'apparition de nouvelles races de l'agent pathogène (Giotis *et al*, 2012). C'est pour cela que la protection raisonnée doit être maintenue afin de réduire l'apparition de ces races résistantes (Bernard, 2013).
- Le greffage : il permet d'avoir une plante résistante à certains agents pathogènes telluriques via son porte-greffe, tout en gardant une vigueur et un fort rendement en fruit (Oda, 2002).
- Le retrait des racines : lors de l'arrachage des cultures, si les racines sont contaminées, il est nécessaire d'en laisser le moins possible dans le sol afin de ne pas augmenter l'inoculum (Terrentroy *et al*, 2014). Néanmoins, il s'agit d'une pratique qui est difficile à mettre en œuvre. De plus, afin de limiter la contamination entre parcelles, il s'agit d'identifier les parcelles contaminées et d'effectuer les travaux du sol dans celles-ci en dernier (Trottin-Caudal *et al*, 2006).
- L'état nutritionnel de la plante : la gestion de la nutrition de la plante est importante. En effet, des apports excessifs d'azote, de phosphate et de potasse peuvent interférer avec le développement des bio-agresseurs. En gérant au mieux la fertilisation azotée, phosphatée et potassique, une diminution du risque de certaines maladies aériennes et telluriques est possible (Launais, 2014). Les projets Fertileg & Fertipro (menés par l'INRA et par le CTIFL respectivement) ont déjà permis de conclure sur certaines pratiques concernant la

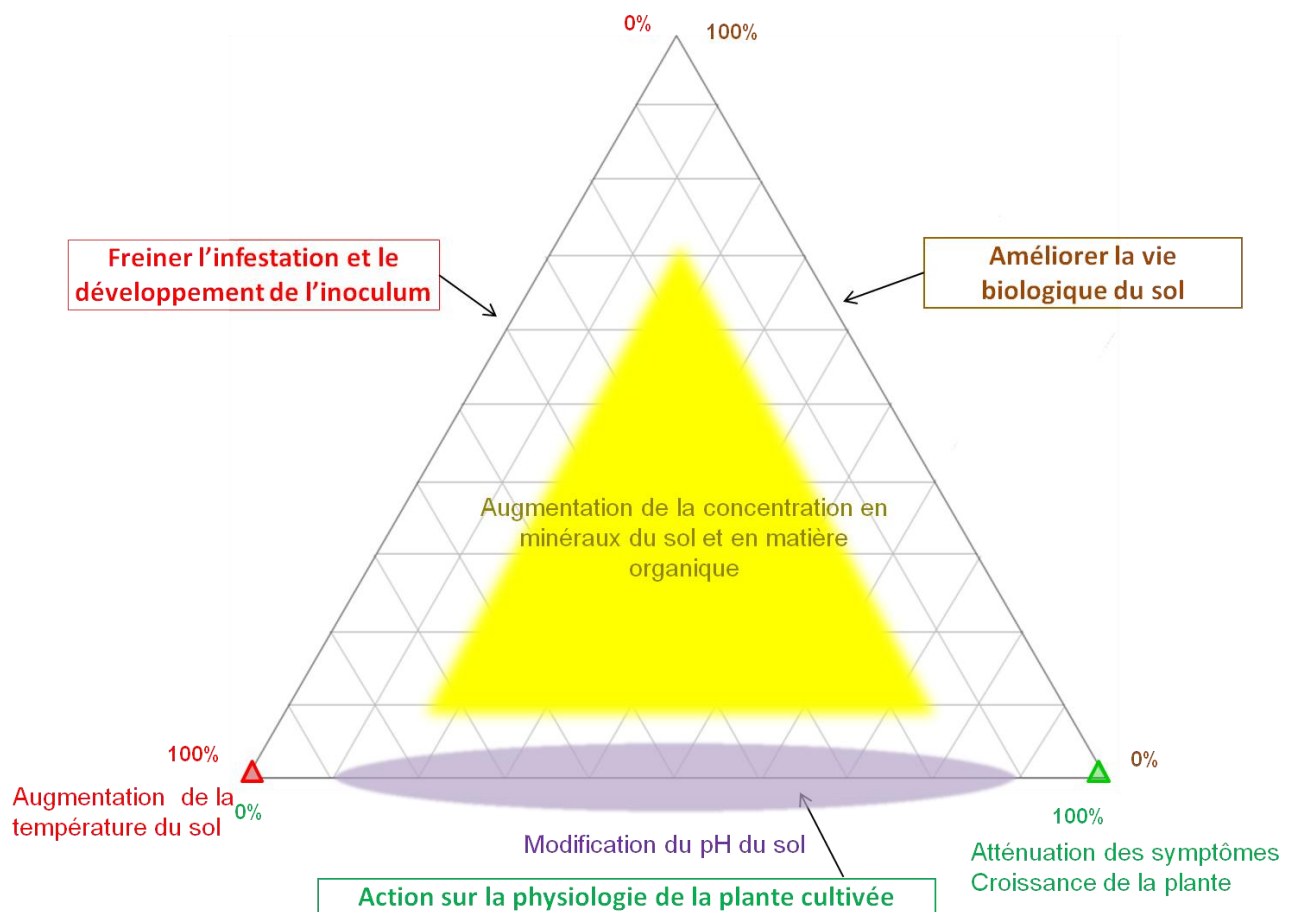


Figure 11: Positionnement des modes d'action du levier "solarisation" par rapport aux trois stratégies du projet GEDUBAT

culture de la tomate et de la laitue pour quelques agents pathogènes. Actuellement, le projet Lilla (mené par l'INRA), vise à réduire l'emploi des produits phytosanitaires tout en expérimentant des conduites culturales. Néanmoins, des études complémentaires sont indispensables afin de connaître au mieux la biologie exacte de chaque pathosystème.

- La solarisation : il s'agit d'une technique de désinfection du sol grâce à un paillage plastique, à base de polyéthylène transparent, durant les saisons chaudes (Stapleton and Devay, 1986). L'augmentation de la température du sol induit la mortalité de certains agents pathogènes. Sur le **tableau IV** (page suivante), on peut voir les températures létales pour les principaux agents pathogènes telluriques en culture maraîchère. Néanmoins, la plupart des agents pathogènes et ravageurs du sol sont mésophiles, ils ne peuvent donc pas survivre à une température supérieure à 32°C. Pour ceux qui sont thermo-tolérants, ils survivent généralement à la solarisation, mais deviennent plus faibles et plus sensibles (Labrada, 2008).

Les expériences sur le terrain ont pu montrer une croissance accrue des plantes dans les sols préalablement désinfectés par solarisation. Les concentrations en matière organique soluble et minéraux du sol sont en effet augmentées. La plus forte augmentation de concentration est le NO_3^- ; puis ensuite : NH_4^+ , K^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} , Cl^- . La solarisation provoque aussi des modifications du pH du sol et de la teneur en matière organique totale. (Chen and Katan, 1981). Le calcium et le magnésium jouent un rôle positif dans la résistance des plantes aux maladies ; de plus, la matière organique soluble et les matières minérales telles que les nitrates influent positivement sur la croissance des plantes (Foury, 1995).

Néanmoins, la solarisation présente des inconvénients. En effet, elle implique de pratiquer des rotations adaptées afin d'avoir des abris libres en été, de respecter la période et les conditions de mise en place, et enfin de gérer la libération des nitrates dans le sol (Izard, 2011). Sur la **figure 11** est présentée le triangle avec les différents modes d'actions du levier "solarisation".

- La désinfection par la vapeur : son principe repose sur l'injection dans le sol de vapeur à 180°C, ce qui va élever la température du sol à 85-90°C dans la couche supérieure du sol (Lizot *et al*, 2000). Elle montre un effet négatif sur la microflore et la faune du sol. De plus, elle réduit la vitesse à laquelle les nutriments minéraux tels que l'azote sont minéralisés et deviennent disponibles pour la plante (Giotis *et al*, 2009). Néanmoins, elle présente de nombreux avantages comme une bonne efficacité contre les adventices et est active contre les agents pathogènes du sol selon la profondeur désinfectée (Lizot *et al*, 2000).

Tableau IV: Températures létales des principaux agents pathogènes telluriques en maraîchage

Agent pathogène	Température létale	Méthodes	Références
<i>Botrytis cinerea</i>	La perte complète de viabilité des sclérotas à 15 cm de profondeur est réalisée à 34,5 degrés-jour pour un seuil de 38°C ; à 25 cm il faut 53,6 degrés-jour pour un seuil de 34°C.	Plein champ	Lopez-Herrera <i>et al</i> , 1994
<i>Colletotrichum coccodes</i>	La température mortelle pour la croissance du mycélium est de 53°C.	Plein champ	Chunguang, 2008
Nématodes <i>Meloidogyne sp.</i>	La chaleur nécessaire pour tuer les nématodes dépend du temps d'exposition cumulé à une température létale spécifique, mais pas à des unités de chaleur cumulées À 40°C: 46h pour tuer 100% des juvéniles au stade J2. A 40°C : 33h pour tuer 100% des œufs.	Etuve	Wang et McSorley, 2008
<i>Pythium sp.</i>	La LD ₉₀ de <i>Pythium ultimum</i> est de 17,9 jours à 37°C ou de 33 minutes à 50°C.	Plein champ	Pullman <i>et al</i> , 1981
<i>Rhizoctonia solani</i>	La LD ₉₀ de <i>R.solani</i> est de 39°C pendant 14 jours ou de 50°C pendant 10 min.	Plein champ	Pullman <i>et al</i> , 1981
<i>Sclerotinia sclerotiorum</i>	La plus haute mortalité des sclérotas a été observée après 9 jours à 35°C, 84 heures à 40°C, 5-6 heures à 50°C et 90-100 min à 55°C.	Etuve et plein champ	Cartia et Asero, 1994

- Le travail du sol : c'est un moyen de diminuer la viabilité des formes de maintien de l'inoculum des agents pathogènes. En effet, toutes les pratiques qui accélèrent la dégradation microbienne des résidus de culture sont favorables au déclin des agents pathogènes. Néanmoins, il est difficile de conclure car les différents types de travail du sol, ainsi que leur période d'application sur l'ensemble du biote varient selon les conditions climatiques et culturelles (Charles *et al*, 2012).
- Le biocontrôle : il y a quatre catégories d'approches en biocontrôle qui sont basées sur l'utilisation (d'après le site de l'IBMA) :
 - De macro-organismes : insectes, nématodes ou acariens ;
 - Des micro-organismes : virus, bactéries ou champignons ;
 - Des médiateurs chimiques : phéromones ;
 - Des substances naturelles d'origine minérale, végétale ou animale.

Pour le cas de la lutte contre les agents pathogènes du sol, les modes d'action directs sont : (Whipps, 1997).

- la compétition : pour l'espace ou les nutriments
- l'antibiose : les antagonistes sécrètent des métabolites contre les agents pathogènes.
 - Exemple : certaines souches de *Trichoderma* se sont révélées comme ayant une activité antagoniste de *Pyrenochaeta lycopersici* (Vanachter *et al*, 1998).
- Le parasitisme : les éléments nutritifs des agents pathogènes sont utilisés par l'agent de biocontrôle. Cela signifie que l'agent de biocontrôle vit au dépend de l'agent pathogène.

Ces agents peuvent aussi avoir des modes d'action indirects : (Whipps, 1997).

- Induction de la résistance (déclenchement de la Résistance Systémique Acquise) : inhibition des symptômes de la maladie résultant de l'inoculation préalable ou simultanée de l'hôte avec un parent proche de l'agent pathogène (généralement appartenant au même genre).
- Promoteur de la croissance des plantes : les modes d'action impliqués dans l'induction de la croissance des plantes ne sont pas toujours très clairs. Les effets directs sont reliés à la production d'hormones végétales telles que les auxines, cytokinines ou gibbérellines.
 - C'est dans cette rubrique que le *Trichoderma harzianum* T-22 utilisé dans le produit Trianum commercialisé par la société Koppert se situe.

Root-knot Rating Chart

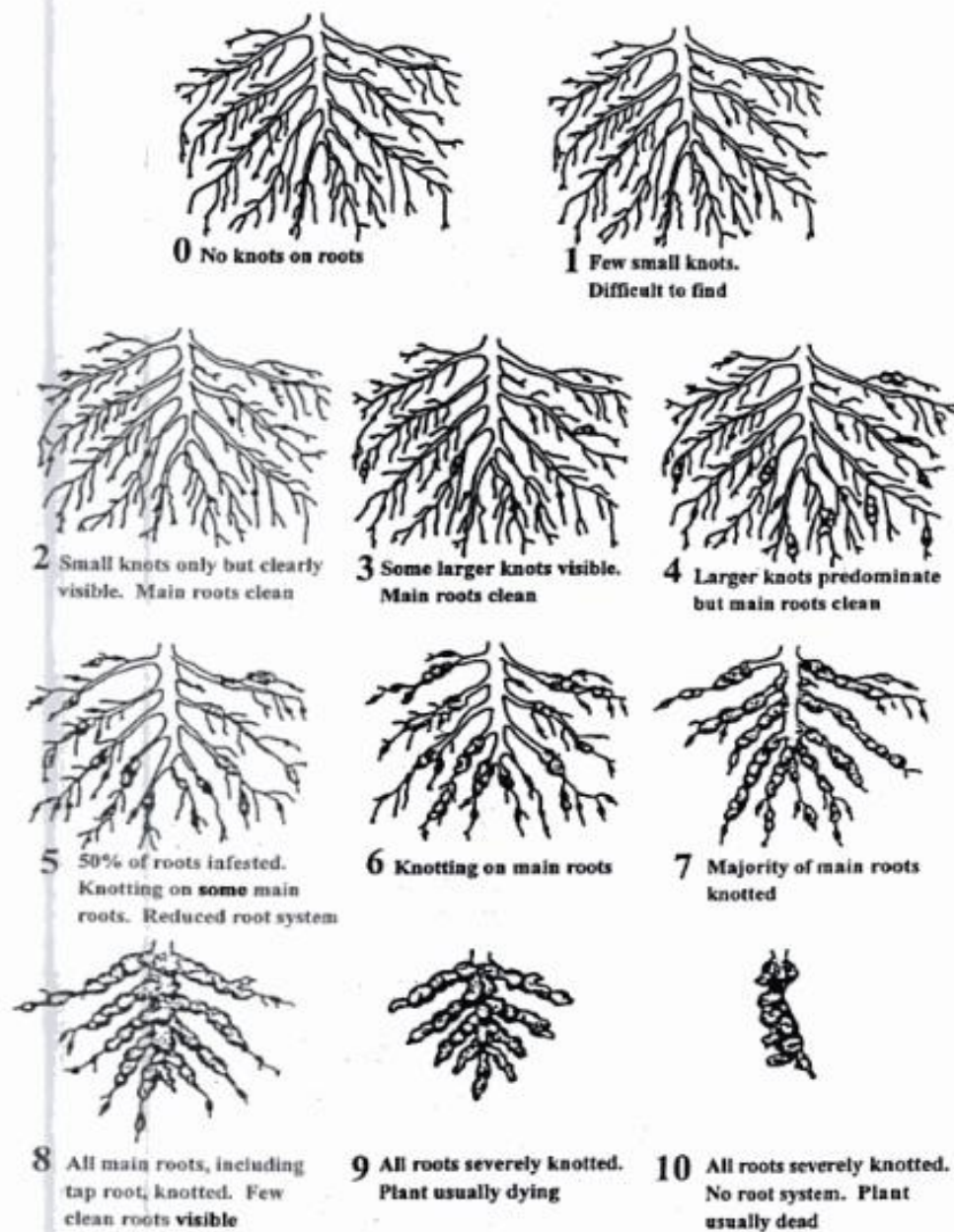


Fig. 9.10. Root galling rating scheme for evaluation of *Meloidogyne* infestation (Bridge and Page, 1980).

Figure 12: Echelle de Zeck : notation des indices de galle

L'échelle va de 0 à 10, où 0 représente un système racinaire sain et complet, ne présentant pas d'infestation ; 10 représente une plante et des racines mortes avec une complète disparition du système racinaire.

- Les Stimulateurs de défense des plantes (SDP) : ils sont inactifs sur l'agent pathogène et agissent sur la plante. Certaines molécules vont induire une réponse de défense en agissant au niveau de la reconnaissance de l'agent pathogène par la plante. D'autres vont s'insérer dans la cascade de signalisation de la plante, ce qui lui permet de mobiliser ses moyens de défense. Et enfin, d'autres ont des modes d'action inconnus (Blanchard *et al*, 2005).

Cette liste non exhaustive de techniques devrait permettre de remplacer les produits chimiques de protection des plantes en les combinant (Chellemi, 2002).

2.2.3. Evolution des symptômes causés par les bioagresseurs telluriques

Par manque de temps, les résultats sur deux sites seulement seront présentés dans ce rapport. L'analyse sur les autres sites et systèmes de culture sera effectuée ultérieurement.

Comme nous l'avons vu dans la partie précédente (Cf **figure 8**), la tomate est cultivée sur le site de Carquefou chaque année dans au moins deux modalités, nous y suivrons les attaques de *Pyrenochaeta lycopersici*. De plus, nous étudierons également le site de l'APREL où le bioagresseur étudié est le nématode *Meloidogyne* sp. Les cultures étudiées pour ce site sont la salade et le melon. Sur chacun des deux sites étudiés, les racines des plantes sont notées après la dernière récolte. Les nécroses observées sont notées sur l'échelle de Zeck (**figure 12**).

Chaque année depuis le début du projet, le même nombre de plantes est noté. Sur le site de Carquefou, il y a 60 plantes notées sur les parcelles M1O, M2O, M1E et M2E. Pour le site de l'APREL il y a 60 plantes notées sur les parcelles C3, C4 et C5.

Les notes attribuées lors de la notation finale sont des INR (Indice de Nécrose Racinaire) pour le cas des agents pathogènes de type champignon ou des IGR (Indice de Galle Racinaire) pour le cas des nématodes.

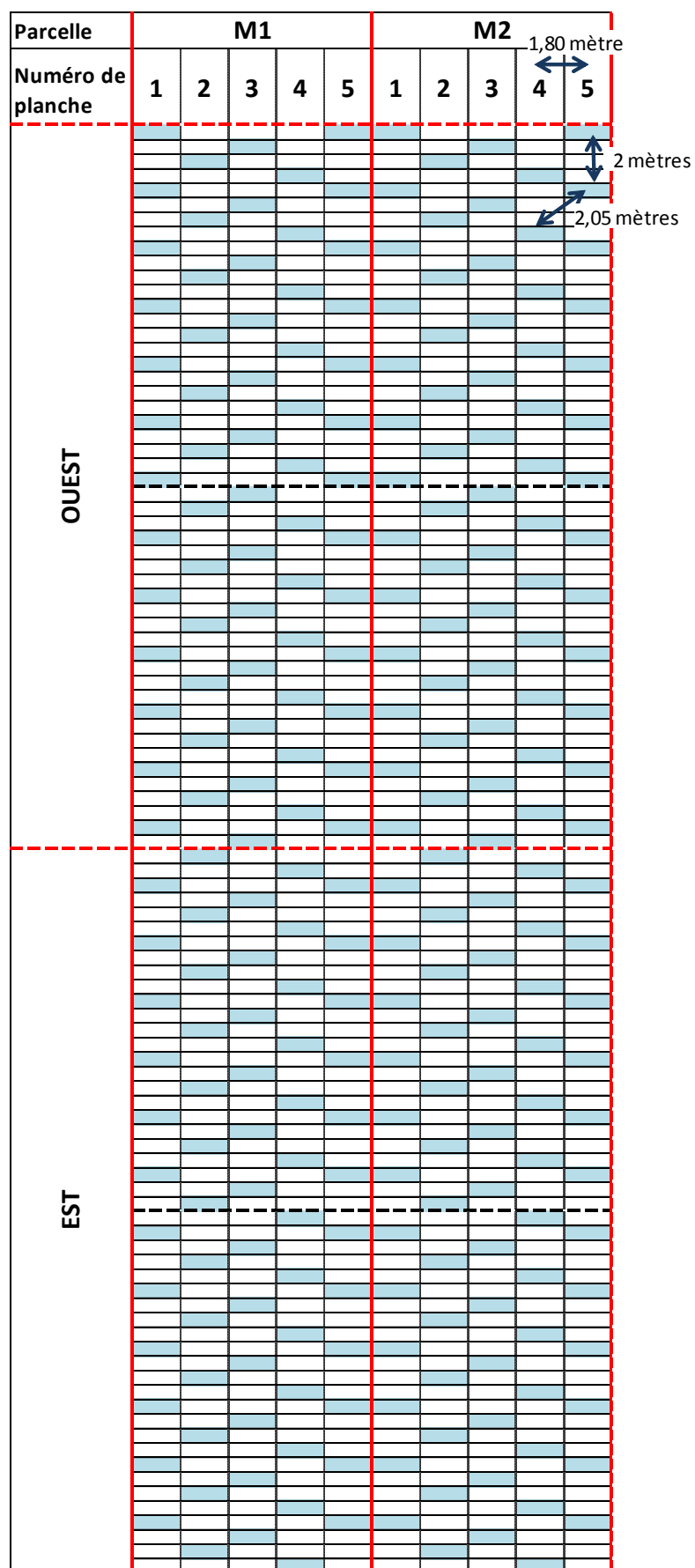
Le calcul des Indices de Nécrose Racinaire et Indices de Galle racinaire permet de calculer le taux d'infestation moyen sur la parcelle.

L'incidence nous permet de voir la fréquence de la maladie au sein de la parcelle sans tenir compte de la note affectée à chacun des pieds. En effet, avec ce type de données les pieds de tomate sont sains ou atteints.

La sévérité conditionnelle permet de voir si au sein des individus atteints, la maladie est intense ou non, si les foyers sont constitués de notes faibles ou élevées.

Les Indices de Nécrose Racinaire (INR), Indices de Galle Racinaire (IGR), incidences et sévérités conditionnelles ont été calculés pour chaque modalité avec les formules suivantes:

$$INR \text{ moyen ou } IGR \text{ moyen} = \frac{\sum i x_i}{\text{nombre total de plantes notées}}$$



1,80 mètre

2 mètres

2,05 mètres

OUEST

EST

Chaque carré = 1 plante

Plantes Notées

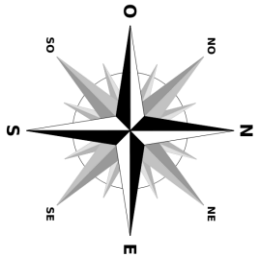


Figure 13: Plan d'échantillonnage du site de Carquefou

$$Incidence = \frac{\sum \text{des plantes atteintes par la maladie}}{\text{nombre total de plantes notées}}$$

$$Sévérité conditionnelle = \frac{\sum i \cdot x_i}{\text{nombre de plantes notées malades}}$$

avec i : la note appliquée allant de 0 à 10,
 x_i : nombre de plantes dans la classe i .

L'objectif ici est d'observer l'évolution des symptômes dans chacune des modalités. En effet, il n'est pas possible de comparer directement les modalités entre elles car les parcelles ne sont pas les mêmes : caractéristiques au niveau du sol, niveau d'infestation initial différent...

Les Indices de Nécrose Racinaire ainsi que les Indices de Galle Racinaire ont ensuite été analysés statistiquement à l'aide d'une Anova. Si les conditions de l'Anova ne sont pas respectées, un test non-paramétrique de Kruskal-Wallis est effectué. Les sorties du logiciel R (version 3.2.1) sont mises en **annexe II**

Le modèle utilisé pour l'Anova est le suivant:

$$Y_{tk} = \mu + \alpha_t + \varepsilon_{tk}$$

où : Y_{tk} représente l'INR ou l'IGR

μ est l'effet général

α_t est l'effet principal (facteur date)

ε_{tk} est l'erreur (facteur date et facteur répétition)

2.2.4. Analyse spatio-temporelle complémentaire

Afin d'analyser l'évolution spatio-temporelle des dégâts des différents systèmes de culture, nous avons choisi d'effectuer une analyse statistique basée sur la représentation spatiale des Indices de Nécrose Racinaire (*Pyrenochaeta lycopersici*) et Indices de Galle Racinaire (*Meloidogyne* sp).

De même, les résultats sur les deux sites précédents sont présentés dans ce rapport.

Les analyses spatiales sont réalisables sur chacun des deux sites puisque depuis le début du projet chaque culture est mise en place chaque année et que l'effort d'échantillonnage suit le même plan. Les notations ont été réalisées dans des conditions de développement de cultures semblables, on peut donc les comparer entre-elles. Sur la **figure 13** est représenté le plan d'échantillonnage du site de Carquefou. Entre deux planches, il y a 1,80 mètre et entre deux pieds notés sur une même planche, il y a 2 mètres. Comme les pieds sont notés en quinconce, la distance maximale entre deux pieds notés est alors de 2,05 mètres.

Sur la **figure 14**, plan du site de l'APREL, entre deux planches, il y a 1,50 mètre et entre deux pieds notés sur une même planche 3 mètres. Les pieds sont notés en ligne et la distance maximale entre deux pieds notés est alors de 3 mètres.

De la même manière que pour l'analyse précédente, les INR (site de Carquefou) et IGR (site de l'APREL) obtenus lors de la notation à la récolte sont utilisés. Depuis le début du projet, l'emplacement des plantes notées est le même dans les deux sites.

Deux tests vont être effectués. Ils ont été développés par l'INRA d'Avignon à l'Unité de Recherche Plantes et Systèmes de culture Horticoles et à l'Unité de Recherche Biostatistiques et Processus Spatiaux. Etant donné le caractère confidentiel des programmes, seules les sorties du logiciel R vont être détaillées.

La méthode utilisée pour ces tests est la méthode MAP Comparison (logiciel R package en préparation : MapComp (Lavigne *et al*, 2010)). Elle permet d'analyser la répartition spatiale des notes d'attaques à l'aide de tests de permutation au sein de chaque parcelle. Elle va permettre de caractériser la distribution spatiale intra-parcelle des notes de nécrose et de galle racinaire.

La première étape réalisée est la production d'une carte de densité des notes de nécrose racinaire. Elle a été produite en réalisant une interpolation avec notre variable d'intérêt : les notes de nécrose racinaire et notes de galle racinaire. Cette interpolation estime en tout point de la carte (c'est à dire la surface entière de la parcelle y compris les zones où il n'y a pas de plante) la note de nécrose ou de galle racinaire qu'une plante pourrait avoir. Cette interpolation comprend un paramètre h appelé « bandwidth », représentant une largeur de bande passant fonction de la distance entre les points de notation et de la taille de la zone d'échantillonnage (Trichard *et al*, 2014).

La seconde étape de cette méthode correspond à la comparaison des cartes de densité des notes de nécroses acquises par interpolation avec la carte de densité d'échantillonnage correspondant aux points réellement notés. La comparaison est basée sur le calcul de la distance entre ces deux cartes (Ricci *et al*, 2011).

A partir de ces cartes on peut réaliser deux tests:

- a) Ce premier test est basé sur la présence ou non d'une structuration spatiale et ses caractéristiques à un instant t . Pour cela, il y a utilisation d'un test non paramétrique basé sur des permutations de la variable (note de nécrose racinaire) sur les sites d'échantillonnage. L'hypothèse nulle est : l'infestation est aléatoirement distribuée dans le tunnel, il n'y a donc aucune structuration spatiale significative. L'hypothèse alternative : il y a une structuration spatiale des attaques dans le tunnel.

Trois cas se présentent :

- probabilité critique $\leq 0,05$: il y a une hétérogénéité spatiale, la parcelle est donc structurée avec présence de foyers,
 - probabilité critique $\geq 0,95$: il y a une homogénéité spatiale, la parcelle présente une distribution homogène des symptômes,
 - $0,05 < \text{probabilité critique} < 0,95$: il n'y a pas de structuration spatiale, la distribution des symptômes est aléatoire.
- b) Le second test est basé sur la stabilité des structurations entre cartographies de données, soit dans notre cas entre cartographies d'attaques de cultures successives. Il repose sur la même méthode que le test précédent, mais ici ce sont les deux cartes de densité des notes de nécrose et de galle racinaire qui sont comparées. Ce test est donc utilisé pour comparer une même parcelle d'année en année. L'hypothèse nulle est : il n'y a pas de différence entre les structurations spatiales observées pour les deux cartographies. Si elle est vérifiée, cela signifie que la seconde cartographie a une structure spatiale héritée de la première et non significativement différente. L'hypothèse alternative est : la structuration spatiale de la seconde cartographie est significativement différente de la première.

Trois cas se présentent :

- probabilité critique $\leq 0,05$: les cartes sont dites opposées (absence à la date t+1 là où il y avait présence à la date t),
- probabilité critique $\geq 0,95$: les cartes sont semblables (présence aux mêmes endroits aux dates t et t+1),
- $0,05 < \text{probabilité critique} < 0,95$: la distribution est aléatoire entre les différentes années. (Lavigne *et al*, 2010).

Pour le site de Carquefou, nous avons choisi $h=4$ pour le paramètre "bandwidth" car les points d'échantillonnage se trouvent tous à une distance inférieure à 3m les uns des autres. De plus, nous nous trouvons ici dans le cas d'un champignon, ce qui implique une faible vitesse de déplacement. Nous nous attendons alors à voir une dépendance seulement entre des points d'échantillonnage voisins.

Pour le site de l'APREL, nous avons choisi $h=6$ car les points d'échantillonnage se trouvent tous à une distance inférieure à 4 mètres les uns des autres. De plus, nous nous trouvons ici dans le cas d'un nématode, ce qui implique une vitesse de déplacement plus élevée d'une année, et même d'une culture à l'autre. Dans la littérature, il existe peu d'articles concernant l'étude du déplacement des nématodes et surtout sur leur vitesse de déplacement. Néanmoins, on sait que ce

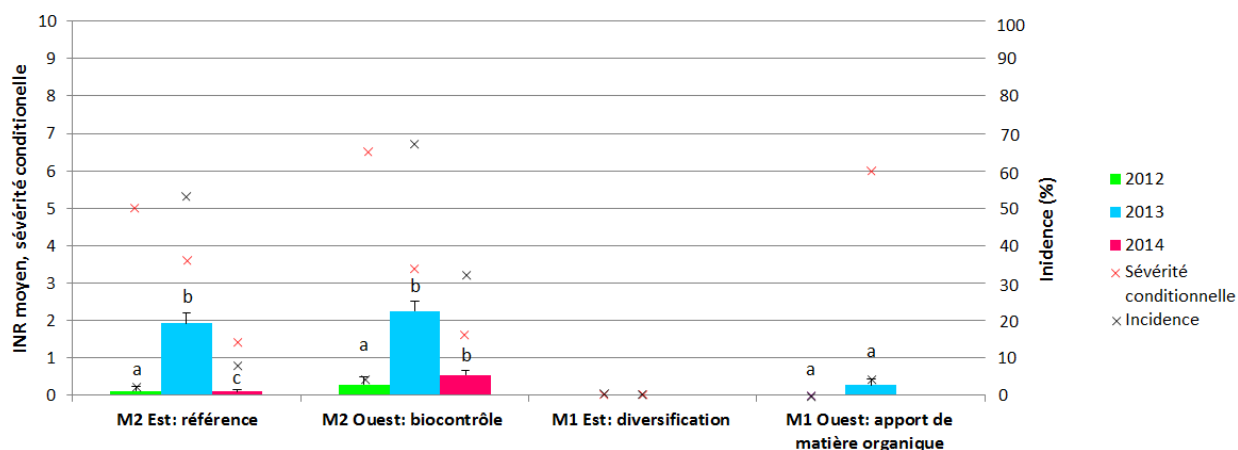


Figure 15: Evolution des attaques de *P. lycopersici* en fonction de la modalité et de l'année - Site de Carquefou. Les barres verticales représentent l'erreur standard (moyenne de 45 répétitions pour 2012 et 60 répétitions pour 2013 et 2014). Les lettres correspondent aux groupes après l'analyse de comparaison multiple (test de Kruskal-Wallis, $\alpha = 0,05$).

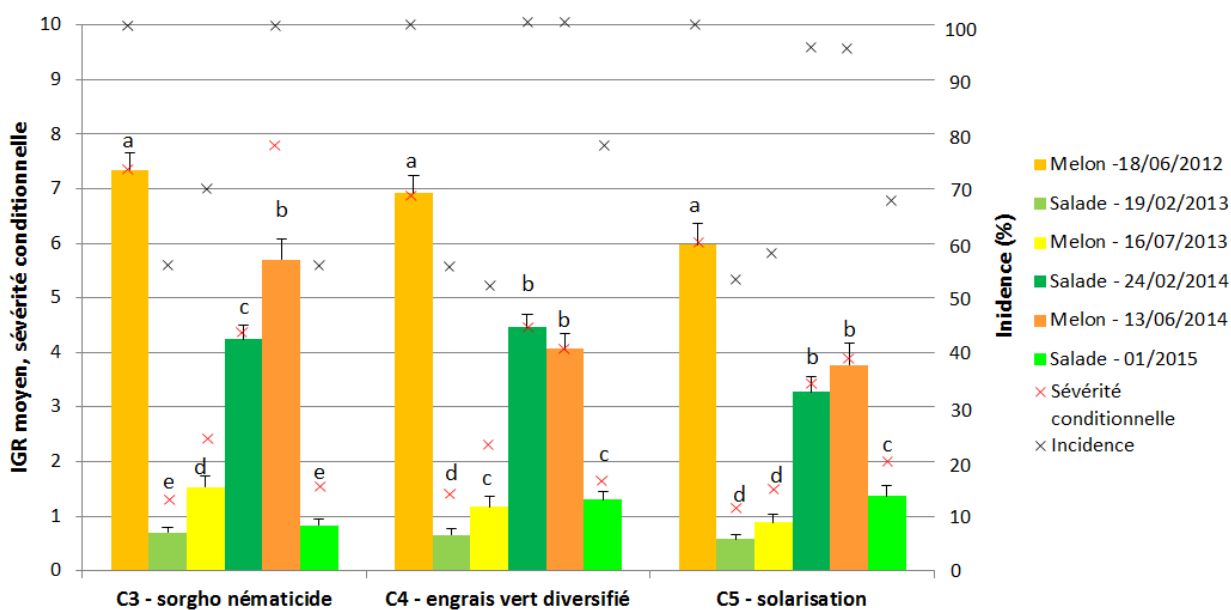


Figure 16: Evolution des attaques de *Meloidogyne* sp en fonction de la modalité et de l'année - Site de l'APREL. Les barres verticales représentent l'erreur standard (moyenne de 60 répétitions). Les lettres correspondent aux groupes après analyse de comparaison multiple (test de Kruskal-Wallis, $\alpha = 0,05$).

sont les larves et les adultes mâles qui peuvent se déplacer dans un film d'eau. Par exemple, les juvéniles J2 de *Meloidogyne incognita* peuvent migrer sur des distances de l'ordre du mètre (Prot, 1975). Nous nous attendons alors à voir une dépendance entre des points d'échantillonnage voisins.

Nous avons effectué 9999 permutations, ce qui nous paraît être un bon compromis entre précision et durée nécessaire pour effectuer le test. En effet, avec 9999 permutations, nous obtenons des probabilités critiques avec quatre chiffres significatifs après la virgule.

3. Résultats

3.1. Evolution des symptômes causés par les bioagresseurs telluriques

3.1.1. Site de Carquefou

Sur la **figure 15**, nous pouvons voir l'évolution de l'INR moyen en fonction des modalités et de la date de notation finale. Ce graphique nous montre une même tendance pour les quatre modalités : M1 Ouest (Apport de matière organique), M1 Est (Diversification), M2 Ouest (Biocontrôle) M2 Est (Référence). Au début du projet, en 2012, nous pouvons voir que les niveaux d'INR sont faibles pour l'ensemble des modalités, puis en 2013 l'INR moyen augmente, enfin en 2014 il re-diminue. Toutefois les INR sont toujours plus élevés dans la modalité M2 Ouest (biocontrôle). De plus, dans cette modalité, la diminution des Indices de Nécrose Racinaire n'est pas significative entre 2013 et 2014. On observe ici un INR faible ainsi qu'une incidence plutôt faible sur le site de Carquefou, néanmoins la sévérité conditionnelle est tout de même élevée, ce qui signifie que peu de plantes sont touchées par *Pyrenochaeta lycopersici*, mais celles qui le sont, le sont fortement.

3.1.2. Site de l'APREL

Sur la **figure 16**, nous pouvons voir l'évolution de l'IGR moyen en fonction des modalités et de la date de notation finale. Ce graphique nous montre des tendances générales, sur les trois parcelles, en culture de melon, l'IGR moyen est élevé en 2012, baisse en 2013, et ré-augmente en 2014 sans toutefois atteindre le niveau de 2012. Pour la culture de salade, en parcelle C3, l'IGR moyen est faible en 2013, augmente en 2014 et re-diminue en 2015, en étant significativement identique au seuil de 5%, de l'IGR de 2013. Pour les parcelles C4 et C5, on observe une tendance identique : faible infestation sur la salade de 2013, forte augmentation en 2014, puis diminution en 2015 sans toutefois arriver au niveau de 2013. Sur ce site, on observe une forte corrélation entre l'IGR moyen et la sévérité conditionnelle. En effet, ces données sont superposables, quand l'IGR est faible on observe des sévérités conditionnelles faibles et quand il est élevé la sévérité conditionnelle l'est également. On peut donc conclure que l'infestation est homogène.

Tableau V: Résultats de l'analyse du test 1 (homogénéité des parcelles) - site de Carquefou - parcelle M2O (biocontrôle)

Parcelle	Date	Probabilités critiques
M2O	2012	0,0632
M2O	2013	0,0003
M2O	2014	0,0393

Tableau VI: Résultats de l'analyse du test 1 (homogénéité des parcelles) - site de Carquefou - parcelle M2E (référence)

Parcelle	Date	Probabilités critiques
M2E	2012	0,4867
M2E	2013	0,0002
M2E	2014	0,3376

Tableau VII: Résultats de l'analyse du test 2 (évolution temporelle) - site de Carquefou - parcelle M2O (biocontrôle)

Parcelle	Date	Date	Probabilités critiques
M2O	2012	2013	0,1112
M2O	2013	2014	0,7207

Tableau VIII: Résultats de l'analyse du test 2 (évolution temporelle) - site de Carquefou - parcelle M2E (référence)

Parcelle	Date	Date	Probabilités critiques
M2E	2012	2013	0,3397
M2E	2013	2014	0,0046

Ce qui est confirmé par une incidence très forte dans la plupart des cultures. Globalement, sur ce site les plantes sont très atteintes par les nématodes *Meloidogyne* sp. On observe aussi que les salades sont moins sensibles que les melons aux nématodes car les IGR et la sévérité sont toujours plus élevés pour la culture de melon que dans la culture de salade. Ce phénomène s'explique par la saison de culture du melon (été) et de la salade (hiver) ainsi que par leur différence de sensibilité à cet agent pathogène.

3.2. Analyse spatio-temporelle des attaques

3.2.1. Site de Carquefou. Attaque de *Pyrenochaeta lycopersici* sur cultures de tomate

Nous n'effectuerons pas ces analyses sur la parcelle "multi-chapelle 1", en effet au sein de cette multi-chapelle, il y a très peu de symptômes et il n'est donc pas utile de faire les analyses sur ces modalités.

3.2.1.1. Homogénéité des cartes

Nous pouvons voir dans les **tableaux V et VI**, les résultats des probabilités critiques obtenues après avoir effectué le premier test. Nous allons donc pouvoir conclure sur la répartition, aléatoire ou ordonnée, de l'infestation.

La modalité M2O (biocontrôle) pour la première année du projet a une probabilité critique comprise entre 5% et 95%, néanmoins elle est égale à 6,3%, nous pouvons donc dire que l'infestation est structurée au sein de la parcelle au risque de 7%. Ce résultat se confirme pour les années suivantes à des seuils inférieurs à 5%. L'infestation de cette parcelle est répartie de manière hétérogène, on observe alors une structure spatiale qui nous permet de conclure sur la présence de foyers pour les trois années étudiées.

Pour la modalité M2E (référence), on obtient en 2012 et en 2014 des probabilités critiques comprises entre 5 et 95% : l'infestation par *Pyrenochaeta lycopersici* est aléatoirement répartie dans le tunnel. En 2013, on obtient une probabilité critique inférieure à 5%, ce qui nous permet donc de conclure sur la présence de foyers au sein de cette parcelle pour cette année seulement.

3.2.1.2. Comparaison de cartes dans le temps

Nous pouvons voir dans les **tableaux VII et VIII**, les résultats des probabilités critiques obtenues après avoir effectué le second test qui correspond au suivi de l'évolution temporelle des attaques. La modalité M2O (biocontrôle), avec des valeurs critiques comprises entre 5 et 95% d'année en année nous montre une répartition aléatoire des symptômes.

Pour la modalité M2E (référence) les probabilités critiques sont comprises entre 5 et 95%, ce qui nous permet de dire que les infestations sont réparties de manière aléatoire entre 2012 et 2013. Néanmoins, la carte de 2013 est opposée à celle de 2014: là où il y avait des symptômes en 2013, il n'y en a plus en 2014.

Tableau IX: Résultats de l'analyse du test 1 (homogénéité des parcelles) - site de l'APREL - parcelle C3 (sorgho nématicide)

Parcelle	Date	Culture précédente	Probabilités critiques
C3	18/06/2012	Melon	0,0467
C3	19/02/2013	Salade	0,0004
C3	16/07/2013	Melon	0,0089
C3	24/02/2014	Salade	0,0261
C3	13/06/2014	Melon	0,0003
C3	26/01/2015	Salade	0,0029

Tableau X: Résultats de l'analyse du test 1 (homogénéité des parcelles) - site de l'APREL - parcelle C4 (engrais vert diversifié)

Parcelle	Date	Culture précédente	Probabilités critiques
C4	18/06/2012	Melon	0,0244
C4	19/02/2013	Salade	0,0793
C4	16/07/2013	Melon	0,4142
C4	24/02/2014	Salade	0,3167
C4	13/06/2014	Melon	0,8097
C4	21/01/2015	Salade	0,0298

Tableau XI: Résultats de l'analyse du test 1 (homogénéité des parcelles) - site de l'APREL - parcelle C5 (solarisation)

Parcelle	Date	Culture précédente	Probabilités critiques
C5	18/06/2012	Melon	0,1893
C5	19/02/2013	Salade	0,1424
C5	16/07/2013	Melon	0,2019
C5	24/02/2014	Salade	0,0910
C5	13/06/2014	Melon	0,2307
C5	21/01/2015	Salade	0,3210

Tableau XII: Résultats de l'analyse du test 2 (évolution temporelle) - site de l'APREL - parcelle C3 (sorgho nématicide)

Parcelle	Date Culture précédente	Date Culture précédente	Probabilités critiques
C3	18/06/2012 Melon	19/02/2013 Salade	0,0158
C3	19/02/2013 Salade	16/07/2013 Melon	0,9749
C3	16/07/2013 Melon	24/02/2014 Salade	0,9988
C3	24/02/2014 Salade	13/06/2014 Melon	0,9918
C3	13/06/2014 Melon	26/01/2015 Salade	0,8531

3.2.2. Site de l'APREL. Attaque de *Meloidogyne* sp sur cultures de melon et de salade

3.2.2.1. Homogénéité des cartes

Nous pouvons voir dans les **tableaux IX à XI** les résultats des probabilités critiques obtenues après avoir effectué le premier test. Nous allons donc pouvoir conclure sur la répartition, aléatoire ou ordonnée, de l'infestation.

La modalité C3 (sorgho nématicide) présente après chaque culture des probabilités critiques inférieures à 5%. On peut donc conclure que la parcelle C3 présente une hétérogénéité spatiale, il y a des foyers de symptômes au sein de cette parcelle.

La modalité C4 (engrais vert diversifié) présente pour deux dates des probabilités critiques inférieures à 5% pour la notation après la première et la dernière culture, ce qui correspond à une structuration spatiale au début et à la fin de la période d'essai étudiée. Entre ces deux dates, la répartition des symptômes est aléatoire.

La modalité C5 (solarisation) présente pour chacune des notations post-récolte, une répartition aléatoire des symptômes, il n'y a pas de foyers détectés par cette méthode.

3.2.2.2. Comparaison de cartes dans le temps

Dans les **tableaux XII à XIV** (page suivante), se trouvent les résultats des probabilités critiques obtenues après avoir effectué le second test pour le site de l'APREL.

Pour la modalité C3 (sorgho nématicide) entre les deux premières cultures, nous nous trouvons dans le cas où les cartes sont opposées, c'est-à-dire que les infestations à la première date de notation n'étaient pas présentes à la deuxième notation. Ensuite, entre chaque culture entre le 19 février 2013 et le 13 juin 2014, les cartes sont semblables, les symptômes trouvés en année t+1 sont aux mêmes endroits que ceux en année t. Entre le 13 juin 2014 et le 26 janvier 2015, on se retrouve dans le cas d'une distribution aléatoire des symptômes entre les deux cultures.

Pour la modalité C4 (engrais vert diversifié), entre les deux premières cultures, les cartes sont opposées, c'est-à-dire que les symptômes retrouvés après la première culture ne sont pas retrouvés dans la culture suivante. Ensuite, les répartitions sont aléatoires entre chaque culture.

Pour la modalité C5 (solarisation), la répartition des symptômes se fait de manière aléatoire entre chaque culture.

De plus, l'analyse de comparaison de cartes entre dates successives pour culture de melon et pour culture de laitue respectivement a également été réalisée afin de tester l'évolution entre des cultures identiques. Cette analyse n'a rien donné, toutes les probabilités critiques nous permettent de conclure que la distribution est homogène entre les différentes années quand on se focalise sur une culture.

Tableau XIII: Résultats de l'analyse du test 2 (évolution temporelle) - site de l'APREL - parcelle C4 (engrais vert diversifié)

Parcelle	Date Culture précédente	Date Culture précédente	Probabilités critiques
C4	18/06/2012 Melon	19/02/2013 Salade	0,0268
C4	19/02/2013 Salade	16/07/2013 Melon	0,3075
C4	16/07/2013 Melon	24/02/2014 Salade	0,2660
C4	24/02/2014 Salade	13/06/2014 Melon	0,4066
C4	13/06/2014 Melon	21/01/2015 Salade	0,0829

Tableau XIV: Résultats de l'analyse du test 2 (évolution temporelle) - site de l'APREL - parcelle C5 (solarisation)

Parcelle	Date Culture précédente	Date Culture précédente	Probabilités critiques
C5	18/06/2012 Melon	19/02/2013 Salade	0,2024
C5	19/02/2013 Salade	16/07/2013 Melon	0,2959
C5	16/07/2013 Melon	24/02/2014 Salade	0,5571
C5	24/02/2014 Salade	13/06/2014 Melon	0,3969
C5	13/06/2014 Melon	21/01/2015 Salade	0,7063

Tableau XV: Bilan annuel des attaques de *P. lycopersici* sur le site de Carquefou

	2012	2013	2014
Homogénéité des cartes			
M20 (Biocontrôle)	Structurée	Structurée	Structurée
M2E (Référence)	Aléatoire	Structurée	Aléatoire
Incidence (%)			
M20 (Biocontrôle)	4,4	66,2	32,3
M2E (Référence)	2,2	53,3	8,3
M10 (Apport de matière organique)	0	4,6	-
M1E (Diversification)	0	0	-
Sévérité conditionnelle			
M20 (Biocontrôle)	6,5	3,4	1,7
M2E (Référence)	5	3,6	1,2
M10 (Apport de matière organique)	0	6	-
M1E (Diversification)	0	0	-

3.3. Synthèse des résultats

Dans les **tableaux XV et XVI** (page suivante), nous avons regroupé l'ensemble des résultats pour le site de Carquefou. Le site de Carquefou est globalement peu infesté dans les modalités M2 Ouest (biocontrôle) et M2 Est (référence), et ne présente pas de symptôme dans les modalités M1 Ouest (apport de matière organique) et M1 Est (diversification) ; en effet les INR moyens sont peu élevés. Néanmoins, quand les plantes sont touchées, elles le sont fortement, ce qui est traduit par une incidence faible et une sévérité conditionnelle plutôt élevée démontrant la présence de foyers. En effet, l'analyse statistique confirme cette présence de foyers chaque année pour la modalité M2 Ouest (biocontrôle) et pour l'année 2013 en M2 Est (référence) quand l'infestation était la plus importante. Concernant l'évolution temporelle des symptômes, en M2 Est (référence), il y a une augmentation de l'INR moyen entre 2012 et 2013 puis une diminution entre 2013 et 2014, les cartes sont statistiquement opposées, la baisse est significative. En M2 Ouest (biocontrôle) l'évolution n'est pas assez importante pour être significative ce qui entraîne une évolution temporelle aléatoire des symptômes.

Dans les **tableaux XVII et XVIII** (page suivante), nous avons regroupé l'ensemble des résultats pour le site de l'APREL. Le site de l'APREL est très infesté dans chacune des modalités, l'IGR moyen est fort dans chacune des modalités, mais de manière générale il est toujours plus élevé dans les cultures de melon que pour la salade. De plus, les plantes touchées le sont très fortement ce qui est traduit par une incidence très élevée et une sévérité conditionnelle moyenne. La répartition des attaques sur ce site est généralisée et diffuse, il n'y a pas de détection des foyers, la structuration est aléatoire. Quand la structuration nous montre la présence de foyers, ceux-ci sont liés à la répartition des symptômes sur les bordures des parcelles (modalité C3 (sorgho nématicide) et C4 (engrais vert diversifié) en juin 2012 et janvier 2015). En ce qui concerne l'évolution temporelle des attaques, pour la modalité C3 (sorgho-nématicide) lorsque les cartes sont opposées il s'agit d'analyses effectuées après la mise en place de sorgho et d'une solarisation. Pour les modalités C4 (engrais vert diversifié) et C5 (solarisation), les pratiques mises en place ne semblent pas avoir d'effet sur l'évolution temporelle des symptômes.

4. Discussion

4.1. Efficacité des leviers

Sur le site de Carquefou, quatre systèmes sont à l'étude et quatre stratégies ont été utilisées. Les multi-chapelles où se trouve l'essai sont très peu infestées. L'objectif sur ce système est donc de conserver un bon état sanitaire des sols. Tandis que sur le site de l'Aprél, 3 systèmes sont étudiés. Les parcelles sont situées chez un producteur et sont très infestées, l'objectif est alors ici de diminuer cette infestation de nématodes.

Tableau XVI: Bilan des évolutions interannuelles des attaques de *P. lycopersici* sur le site de Carquefou

	2012-2013	2013-2014
Evolution temporelle		
M20 (Biocontrôle)	Aléatoire	Aléatoire
M2E (Référence)	Aléatoire	Opposée
INR moyen		
M20 (Biocontrôle)	↗	↘
M2E (Référence)	↗	↘
M10 (Apport de matière organique)	=	-
M1E (Diversification)	=	-

Tableau XVII: Bilan annuel des attaques de *Meloidogyne* sp sur le site de l'APREL

	Melon - juin 2012	Salade - février 2013	Melon - juillet 2013	Salade - février 2014	Melon - juin 2014	Salade - janvier 2015
Homogénéité des cartes						
C3 (sorgho nématocide)	Structurée	Structurée	Structurée	Structurée	Structurée	Structurée
C4 (engrais vert diversifié)	Structurée	Aléatoire	Aléatoire	Aléatoire	Aléatoire	Structurée
C5 (solarisation)	Aléatoire	Aléatoire	Aléatoire	Aléatoire	Aléatoire	Aléatoire
Incidence (%)						
C3 (sorgho nématocide)	100	56,7	70,0	98,3	98,3	56,7
C4 (engrais vert diversifié)	100	46,7	51,7	100,0	100,0	78,3
C5 (solarisation)	100	53,3	58,3	96,6	96,7	68,3
Sévérité conditionnelle						
C3 (sorgho nématocide)	7,4	1,2	2,2	4,3	5,8	1,5
C4 (engrais vert diversifié)	6,9	1,4	2,3	4,5	4,1	1,7
C5 (solarisation)	6,0	1,1	1,5	3,4	3,9	2,0

Tableau XVIII: Bilan des évolutions interannuelles des attaques de *Meloidogyne* sp sur le site de l'APREL

	Melon juin 2012 Salade février 2013	Salade février 2013 Melon juillet 2013	Melon juillet 2013 Salade février 2014	Salade février 2014 Melon juin 2014	Melon juin 2014 Salade - janvier 2015
Evolution temporelle					
C3 (sorgho nématocide)	Opposée	Semblables	Semblables	Semblables	Opposée
C4 (engrais vert diversifié)	Opposée	Aléatoire	Aléatoire	Aléatoire	Aléatoire
C5 (solarisation)	Aléatoire	Aléatoire	Aléatoire	Aléatoire	Aléatoire
IGR moyen					
C3 (sorgho nématocide)	↘	↗	↗	↗	↘
C4 (engrais vert diversifié)	↘	↗	↗	=	↘
C5 (solarisation)	↘	=	↗	=	↘

- a) Dans le système de référence (M2E), l'objectif est de freiner l'infestation grâce au greffage. En 2012, la première année du projet, le niveau d'infestation était faible. Dans cette parcelle, il n'y avait jamais eu de cucurbitacées et de solanacées avant cette date, cela explique le faible niveau d'infestation sur tomate non greffée (incidence : 2%). Lors de la seconde année du projet, l'infestation de la parcelle a considérablement augmenté sur des tomates non greffées. En 2014, il a été décidé de choisir le greffage comme levier principal contre ce bioagresseur, l'incidence de la maladie est passée de 53% à 8%. Le greffage semble donc un moyen satisfaisant pour contrôler l'infestation, néanmoins il faudra reproduire l'expérience plusieurs années de suite afin de montrer la répétabilité des résultats et l'effet à long terme. Il s'agira de voir dès les résultats de septembre 2015 si le faible niveau d'infestation se poursuit ou non car la résistance amenée par le greffage peut facilement être contournée (Giotis *et al.*, 2012).
- b) Dans les systèmes biocontrôle (M2O) sur le site de Carquefou, sorgho-nématicide (C3) et engrais vert diversifié (C4) sur le site de l'APREL, la stratégie était d'employer des moyens de biocontrôle et/ou d'implanter des engrais verts et des plantes assainissantes. Sur la modalité M2O, la gestion du Corky-root sur tomate a été jusqu'alors insuffisante par la seule utilisation de produit de biocontrôle (*Trichoderma harzianum*). Pour les systèmes C3 (sorgho nématicide) et C4 (engrais vert diversifié), ils ne permettent pas de protéger les cultures des nématodes de façon durable. Cependant, la culture du sorgho associée à une solarisation a permis de diminuer l'attaque des nématodes après la culture du melon de 2012 et celui de 2014. On observe un retour rapide des nématodes avec un engrais vert seulement. Cette stratégie semble risquée puisque l'on se pose encore de nombreuses interrogations quant à l'efficacité à court terme de ces méthodes. Cela est notamment dû à une méconnaissance des conditions d'application des produits de biocontrôle testés. La synergie positive de ces leviers engrais verts, plantes assainissantes et biocontrôle, si elle existe, sera donc à valider sur le long terme.
- c) Dans les systèmes diversification (M1E) et apport de matière organique (M1O) sur le site de Carquefou, il s'agit d'apporter de la matière organique et/ou de diversifier les cultures. L'utilisation de matière organique et une diversification modérée donnent de très bons résultats pour le moment d'un point de vue sanitaire sur le site de Carquefou. Les parcelles étant très peu infestées sur le site de Carquefou, il est possible que l'apport de matière organique et la diversification des cultures permettent de contrôler le faible niveau d'infestation, ce qui correspondrait à de faibles populations d'agents pathogènes.
- d) Dans le système solarisation (C5) de l'APREL, l'objectif est de freiner l'infestation grâce à la solarisation : ce système de désinfection est utilisé systématiquement après le melon. Cette méthode permet d'avoir un effet « choc » sur les attaques de nématodes après la culture de melon de juin 2012 et de juin 2014, mais il est nécessaire qu'elle soit effectuée

dans de bonnes conditions. Pour obtenir un effet durable, l'utilisation d'un seul levier ne semble pas suffisante.

En termes de perspectives, il serait envisageable d'ajouter des leviers techniques ; comme par exemple l'apport d'extrait d'algues (la chitine en particulier). En effet, l'apport de chitine a été associé à des réductions de l'incidence des maladies telluriques. Néanmoins, peu d'informations sont disponibles sur son efficacité sur les maladies telluriques touchant la tomate et il serait intéressant de l'étudier. De plus pour limiter le déplacement des nématodes, une gestion rigoureuse de l'irrigation est indispensable (Pinkerton *et al*, 1987)

4.2. Caractérisation des structures spatiales des attaques

La maille d'observation au CTIFL de Carquefou pour *Pyrenochaeta lycopersici* est trop grande, en effet dans la largeur de la parcelle, il n'y a que 5 points de notation situés sur chacune des planches ; il en est de même pour la parcelle sur le site de l'APREL où il n'y a que 3 points de notation dans la largeur. Néanmoins, ce nombre de points de notation dans la largeur de la parcelle ne peut pas être modifié car il s'agit de la mise en place même de la parcelle qui est adaptée aux outils agricoles de l'exploitation et à la distance nécessaire entre deux rangs de tomates. Il faudrait pour le site de Carquefou augmenter le nombre de plantes notées au sein d'une même planche, c'est-à-dire passer à une plante notée tous les 1 mètre ou 1,50 mètre au lieu d'une plante tous les 2 mètres. Pour le site de l'APREL, il faudrait effectuer un maillage de notation en quinconce afin de réduire la distance entre chaque pied noté sans avoir à augmenter l'effort d'échantillonnage car il y a dans ces parcelles une contrainte importante : ce sont des parcelles situées chez un producteur qui ne peut peut-être pas se permettre de laisser en place les cultures le temps de la notation après la dernière récolte car il peut avoir besoin rapidement, après la fin de la culture, de travailler son sol afin de pouvoir le re-cultiver. Néanmoins, si aucune contrainte de temps n'apparaît, il serait intéressant de noter les végétaux tous les 2 mètres au lieu de tous les trois mètres. Il faudrait tout d'abord un effort d'échantillonnage plus élevé, en effet dans le cas des bioagresseurs étudiés au cours de ce rapport, il leur est sans doute difficile de parcourir plus de 3m par an pour le *Pyrenochaeta lycopersici* et plus de 4m par an pour *Meloidogyne* sp.

Actuellement, nos résultats ne nous permettent pas de conclure statistiquement car suivant les modalités nous obtenons des résultats contradictoires.

En terme de structuration spatiale, la grande majorité des attaques de *Meloidogyne* sp ne présente pas de structure spatiale significative, mais cette conclusion n'est pas généralisable. En effet, sur les trois parcelles suivies à l'APREL, la parcelle C3 présente une structuration en foyers et une conservation de la structuration spatiale au cours du temps jusqu'en juin 2014. Il est donc intéressant de vérifier d'où peut provenir ce résultat. La seule différence entre la modalité C3

(sorgho nématicide) et la modalité C4 (engrais vert diversifié) provient de l'espèce utilisée comme engrais vert. On peut donc se demander si le sorgho nématicide a joué son rôle car on n'observe pas de diminution de l'incidence au fur et à mesure des cultures successives. Il en est de même pour les autres modalités. De plus, le sorgho et les engrais verts diversifiés n'ont pas le même système racinaire, ce qui va entraîner des modifications de la structure du sol. On peut donc se demander si la structure du sol après avoir cultivé du sorgho n'est pas favorable à la propagation des nématodes. De plus, la méthode de structuration spatiale utilisée ici ne permet pas de mettre en évidence la structuration en ligne avec des effets de bordures (Peyrard *et al*, 2010)

Dans un second temps, nous avons testé la stabilité des structures spatiales des attaques entre cultures successives au sein de chaque modalité. Initialement, nous nous attendions à observer sur les parcelles des évolutions temporelles continues, ce qui s'expliquerait par la propagation de proche en proche des agents pathogènes. Néanmoins, nos résultats sont également contradictoires entre les modalités.

D'un point de vue spatial, les attaques de *Pyrenochaeta lycopersici* et *Meloidogyne* sp semblent se caractériser par une absence de distribution organisée pour une culture. Cette constatation est intéressante car on s'attendait à observer la présence de foyers d'attaques qui se conservent au cours du temps notamment du fait de la longue survie des microscélérotés (White et Scott, 1972) et des œufs de nématodes dans le sol (Blancard *et al*, 2003 ; Djian-Caporalino *et al*, 2009).

On peut émettre plusieurs hypothèses pour expliquer ce résultat:

- La méthode d'observation n'est pas assez précise. En effet, comme expliqué dans la partie matériel et méthodes, les points de notations sont assez éloignés les uns des autres, 2,05 mètres pour *Pyrenochaeta lycopersici* et 3 mètres pour *Meloidogyne* sp.
- L'importance des conditions de culture: en culture de tomate sur le site de Carquefou, les planches sont paillées, ce qui peut influencer la distribution de l'eau d'irrigation qui ne pénètre pas dans le sol d'une manière homogène.
- L'analyse ne peut se faire qu'après une longue période d'expérimentation au terme du projet ou plus et non après juste 3 années.

Enfin, il aurait fallu quantifier l'infestation du champignon et du nématode avant le début du projet afin de pouvoir comparer par la suite les notes d'infestation de manière rigoureuse.

5. Conclusion

L'objet de ce stage est d'évaluer techniquement les systèmes de culture des sites de Carquefou et de l'APREL. Ce projet est mené sur cinq années, entre 2012 et 2017; nous sommes actuellement

sur la troisième année du projet, nous ne pouvons donc pas avoir le recul nécessaire pour pouvoir apporter des conclusions définitives.

La diversification des cultures, l'introduction de pratiques alternatives, les stratégies de biocontrôle, l'implantation d'engrais verts et de plantes assainissantes permettraient un contrôle des bioagresseurs à long terme. Mais l'essai est récent et nous ne pouvons pas conclure. Les essais devront être réitérés afin de trouver quelles associations de pratiques culturales sont les plus efficaces.

La diversification des cultures et en particulier, d'hiver, permet le contrôle des bioagresseurs telluriques lorsque les parcelles sont peu infestées. Néanmoins, on ne peut pas affirmer cela lorsque les parcelles sont très infestées.

Un des objectifs de ce projet est de diminuer l'IFT des cultures maraîchères sous abris. Mais nous ne disposons pas actuellement d'IFT de référence en maraîchage pouvant servir de comparaison, ce travail sera effectué lorsque les enquêtes des pratiques culturales en maraîchage auront été dépouillées par la DRAAF.

De plus, dans les essais d'expérimentation système, il est difficile de généraliser. Ici, nous nous trouvons dans le cas d'une étude qui se déroule sur six sites différents par leur situation géographique, leur production, leur agent pathogène et leur production légumière. On peut arriver à des impasses car en fonction du lieu de production, on ne pourra pas appliquer tous les leviers. En effet, la solarisation ne peut s'effectuer que lorsqu'il y a le maximum d'ensoleillement, elle ne pourra alors pas s'appliquer dans le nord de la France. Actuellement, le projet ne donne pas encore de solution clef en main pour les producteurs. Il n'a pas pour objectif de ne tester qu'un facteur en particulier. Pour le moment, il n'y a qu'une partie du volet analyse technique du projet qui a été étudiée. Les différentes combinaisons pratiques alternatives étudiées auront pour objectif de valider leur intérêt dans les différents systèmes de culture, sur plusieurs bioagresseurs et à long terme. L'évaluation technico-économique ainsi que l'impact sur l'environnement de ces systèmes sont également prévus au terme de ce projet. Cette évaluation a déjà été effectuée pour les grandes cultures ainsi que pour la vigne mais n'avait pas encore débuté en maraîchage ; c'est dans ce cadre que le projet GEDUBAT est pionnier.

Ce type d'analyse multi-performances est au cœur des préoccupations des agriculteurs qui doivent concilier viabilité et durabilité économique, sociale et environnementale. Ces enjeux font l'objet des réseaux Dephy-Expe et Ferme dont les résultats sont attendus au terme du plan Ecophyto 2 en 2025.

6. Travaux complémentaires

Au cours de mon stage, j'ai pu participer à l'ensemble des activités du centre de Carquefou, comme le travail en laboratoire, mais aussi en plein champ avec par exemple l'entretien et le

suivi de mon essai (dans une moindre mesure : plantation des tomates, palissage, tailles...) mais aussi la participation à la mise en place et les notations des essais de mes collègues stagiaires. J'ai participé de manière plus approfondie aux points suivants :

6.1. Agrosyst

Ce logiciel est utilisé dans le cadre du projet GEDUBAT.

Le plan Ecophyto se décline en plusieurs actions dont la mise en place d'un réseau national de démonstration, d'expérimentation et de production de références sur des systèmes de cultures économes en produits phytosanitaires, il s'agit du réseau DEPHY. Les différents systèmes de culture testés au sein du réseau DEPHY sont au sein d'exploitations agricoles ou de sites expérimentaux, et ce pour l'ensemble des filières réparties dans toute la France (DEPHY, 2013).

L'outil Agrosyst est le système d'information qui met à disposition les données issues du réseau DEPHY. L'objectif de cet outil développé par l'INRA dans le cadre du plan Ecophyto 2018 est de capitaliser les connaissances des systèmes de culture étudiés, de faciliter leur valorisation et leur analyse. Avec l'aide de cet outil, on peut identifier les systèmes de culture économes en pesticides les plus performants. On favorisera ensuite la diffusion des données aux conseillers ainsi qu'aux agriculteurs. Cet outil assure l'acquisition et l'hébergement de données de nature différente telles que les successions de cultures, les interventions pratiquées sur les cultures, les règles de décisions, les mesures... ; mais aussi le calcul de variables de synthèse, de bilans, de différents indicateurs... ; l'édition de schémas décisionnels et enfin l'interopérabilité avec d'autres systèmes via une interface dédiée (Réseau PIC, 2012).

Ce logiciel permet d'effectuer des études à trois niveaux : environnemental (via la consommation de carburant et l'IFT), agronomique (via le rendement) et socio-économique (via le temps de travail et le nombre de passage). A l'heure actuelle, beaucoup de paramètres pour le maraîchage ne sont pas mis à jour et il n'y a pas de référence (exemple : IFT). Le logiciel est encore en phase d'élaboration. En effet, nous avons commencé par vérifier si les données rentrées dans la base de données étaient correctes (le 22 avril 2015). Après vérification, nous avons remarqué un problème lors de l'export des données. En effet, des erreurs étaient présentes. Nous avons pris contact avec l'équipe de l'INRA chargée de l'élaboration du logiciel ; un bug est présent sur le logiciel, mais ne peut pas être résolu pour le moment par manque de temps de l'équipe. C'est pourquoi je n'ai pas pu poursuivre ce travail dans le cadre de mon stage.

6.2. *Fusarium/Radis*

Le radis peut être attaqué par plusieurs champignons pathogènes, aériens ou telluriques dont la fusariose. *Fusarium oxysporum f. sp. raphani* est un champignon phytopathogène tellurique. Il est responsable de la fusariose du radis dont les symptômes sont un jaunissement nécrotique partiel du feuillage qui se généralise ensuite et des lésions internes de couleur brunâtre au niveau

des vaisseaux du système racinaire. Ces symptômes racinaires s'étendent jusqu'à la partie consommable entraînant son pourrissement puis la mort précoce de la plante. Une baisse considérable des rendements peut être observée jusqu'à 90%. *Fusarium oxysporum f. sp. raphani* étant peu étudié dans le cas de la culture du radis, il s'avère primordial de mieux connaître la biologie de cet agent pathogène pour mettre en place des méthodes de lutte efficaces et durables.

L'objectif de cet essai est de déterminer une méthode d'inoculum de *Fusarium oxysporum f. sp. raphani* la plus adéquate pour réaliser une inoculation fiable et reproductible en conditions semi-contrôlées et observer facilement des symptômes.

Dans cet essai, j'ai pu participer à la création du protocole d'inoculation grâce à l'étude de la bibliographie. Puis, j'ai pu effectuer la mise en place de l'essai, son entretien et les notations.

6.3. *Thielaviopsis basicola* vs antagonistes

Thielaviopsis basicola est un champignon phytopathogène tellurique polyphage responsable de la pourriture noire des racines de nombreuses familles de plantes impliquant des plantes cultivées d'importance économique.

L'un des genres étudiés dans le cadre du biocontrôle de *Thielaviopsis basicola* est *Pseudomonas* spp. Dans le but d'élargir la gamme de solutions contre ce pathogène, il s'agissait ici de vérifier l'efficacité de produits alternatifs, de type agents de biocontrôle. Les essais ont été réalisés en conditions contrôlées sur de la mâche.

Dans le cadre de cet essai, j'ai pu effectuer la notation des symptômes à la récolte. J'ai ensuite analysé les résultats obtenus (analyse de variance).

6.4. Essai Pathosol

L'essai Pathosol, gestion des bioagresseurs telluriques par l'entretien de la santé des sols dans la rotation poireau primeur/mâche en région nantaise a pour but d'évaluer divers itinéraires culturels sur une rotation mâche-poireau primeur afin de limiter l'impact des agents pathogènes telluriques, en particulier *Rhizoctonia solani*, sur mâche.

J'ai participé au cours de cet essai à différentes activités telles que :

- a) Le suivi des caractéristiques physico-chimiques du sol comme la conductivité hydraulique (mesure effectuée à l'aide d'un infiltromètre DECAGOn®) ou la densité apparente.
- b) Le suivi des populations microbiennes du sol aussi bien fongique que bactérienne en faisant un comptage des CFU (Colony Forming Unit).
- c) Le suivi des cultures d'engrais verts et de biofumigation par mesure de la biomasse ou encore par mesure de l'azote nitrique à l'aide d'un test Nitracheck.
- d) Le suivi de l'état sanitaire des cultures en effectuant des notations.

7. Bibliographie

- Abad P., Gouzy J., Aury J.M., Castagnone-Sereno P., Danchin E.G.J., Deleury E., Perfus-Barbeoch L., Anthouard V., Artiguenave F., Blok V.C., Caillaud M.C., Coutinho P.M., Dasilva C., De Luca F., Deau F., Esquibet M., Flutre T., Goldstone J.V., Hamamouch N., Hewezi T., Jaillon O., Jubin C., Leonetti P., Magliano M., Maier T.R., Markov G.V., McVeigh P., Pesole G., Poulain J., Robinson-Rechavi M., Sallet E., Segurens B., Steinbach D., Tytgat T., Ugarte E., Van Ghelder C., Veronico P., Baum T.J., Blaxter M., Bleve-Zacheo T., Davis E.L., Ewbank J.J., Favery B., Grenier E., Henrissat B., Jones J.T., Laudet V., Maule A.G., Quesneville H., Rosso M.N., Schiex T., Smant G., Weissenbach J., Wincker P. (2008). Genome sequence of the metazoan plant-parasitic nematode *Meloidogyne incognita*. *Nature Biotechnology*. 26(8) : 909-915
- Abjean-Uguen A (2013), DEPHYEcophytoBreizleg Réduction d'intrants phytosanitaires : comment et jusqu'où ? *Aujourd'hui et demain*. 114 : 23-25.
- Bailey K. L., Lazarovits G. (2003). Suppressing soil-borne diseases with residue management and organic amendments. *Soil & Tillage Research*. 72 : 169-180.
- Bernard J-L. (2013). Protection intégrée des cultures – fiches pour le conseil des techniques utilisables. France Agricole , AgriProduction, Paris, 256p
- Blancard D., Lot H., Maisonneuve B. (2003). Maladies des salades : Identifier, connaître et maîtriser. Editions INRA. Paris, France. 375p.
- Blanchard A. et Limache F. (2005). Les stimulateurs de défenses naturelles des plantes (SDN). Rapport bibliographique. DAA Protection des plantes et environnement. ENSAM, ENSAR & INA P-G, 2005.18p.
- Bonnefoy N (2012). Les pesticides et leur impact sur la santé et l'environnement. Paris (FR) : Rapport du Sénat, 2012. 348p. n° 42.
- Boullard, B. (1997). Dictionnaire: plantes & champignons. ESTEM, Editions scientifiques, techniques et médicales. 886p.
- Cartia G., Asero C. (1994). The role of temperature regarding *Sclerotinia sclerotiorum* in the soil solarization method. *Acta Horticulturae (ISHS)*. 366: 323-330.
- Charles R., Montfort F. et Sarthou J-P. (2012). Effets biotiques des cultures intermédiaires sur les adventices, la microflore et la faune ; IN : Justes E., *et al.* (2012) Réduire les fuites de nitrates au moyen de cultures intermédiaires – conséquences sur les bilans d'eau et d'azote, autres services écosystémiques. *Rapport d'étude*. INRA (Paris, France). pp. 401-418.
- Chellemi D.O. (2002). Nonchemical Management of Soilborne Pests in Fresh Market Vegetable Production Systems. *Plant disease*. 92:1367-1372.
- Chen, Y. & Katan, J. (1981). Effect of solar heating of soils by transparent polyethylene mulching on their chemical properties. *Soil Science*. 180: 271-277.
- Chunguang R. (2008). Investigation on Diseases of *Bambusa pervariabilis* × *Dendrocalamopsis Daii* and in Chishui of Guizhou Province Biological Characteristics of Major Diseases. *Forest pest and disease*. 1: 006.
- Collange B. (2011). Vers une gestion agronomique des bioagresseurs telluriques en maraîchage sous abri : évaluation de systèmes de culture. Thèse. Université Aix-Marseille II, Marseille. 261p.

- Crunelle D. (2012). La production intégrée : une réponse aux enjeux économiques, environnementaux et sociétaux. *Légumes infos* supplément à *Réussir Fruits & Légumes*, 323 : 4-5.
- Crunelle D. (2012). « Proposer aux producteurs des innovations techniques et variétales dans les systèmes maraîchers sous abris ». *Légumes infos* supplément à *Réussir Fruits & Légumes*, 323 : 12.
- DDTM 44 (2013), Charte pour la prise en compte de l'agriculture dans l'aménagement du territoire, volet maraîchage. 51p.
- Delamarre C. (2011). Désinfection des sols sous abri froid. Chambre d'Agriculture de Lot et Garonne. Aout 2011. 13p.
- Deytieux V, Vivier C, Minette S., Nolot J-M., Piaud S., Schaub A., Lande N., Petit M-S., Reau R., Fourrié L., Fontaine L. (2012). Expérimentation de systèmes de culture innovants : avancées méthodologiques et mise en réseau opérationnelle. *Innovations Agronomiques*. 20 :49-78.
- Djian-Caporalino C., Védie H., Arrufat A. (2009). Gestion des nématodes à galles : lutte conventionnelle et lutes alternatives, l'atout des plantes pièges. *Phytoma*. 624 : 21-25.
- Fiume G. and Fiume F. (2008). Biological control of corky root in tomato. *Comm. Appl. Biol. Sci.*73,2:233-248.
- Giotis C., Markelou E., Theodoropoulou A., Toufexi E., Hodson R., Shotton P., Shiel R., Cooper J., Leifert C. (2009). Effect of soil amendments and biological control agents (BCAs) on soil-borne root diseases caused by *Pyrenochaeta lycopersici* and *Verticillium albo-atrum* in organic greenhouse tomato production systems. *European Journal Plant Pathology*. 123 : 387-400.
- Giotis C., Theodoropoulou A., Cooper J., Hodgson R., Shotton P., Shiel R., Eyre M., Wilcockson S., Markellou E., Liopa-Tsakalidis A., Volakakis N., Carlo Leifert C. (2012). Effect of variety choice, resistant rootstocks and chitin soil amendments on soil-borne diseases in soil-based, protected tomato production systems. *Eur J Plant Pathol*. 134 : 605–617
- Golzar H (2009). First report of *Pyrenochaeta lycopersici*, causal agent of tomato corky root rot in Australia. *Australasian Plant Disease Notes*. 4: 126-128
- Goma-Fortin N. (2009). Gestion de la matière organique des sols en parcelle viticole IN Sitevi, Montpellier, 1 décembre 2009. 24p.
- Goodenough and Maw (1973). Effects of *Pyrenochaeta lycopersici* infection on nutrient uptake by tomato plants. *Ann. Appl. Biol.* 73 : 339-347
- Grove G. G. and Campbell R. N (1987). Host range and survival in soil of *Pyrenochaeta lycopersici*. *Plant Disease*. 71, 9:806-809.
- Foury, C. (1995). Quelques aspects de la désinfection solaire des sols. *Revue Horticole*, 356 : 15-20.
- Hasna M. K. (2007). Corky Root Disease Management in Organic Tomato Production - Composts, Fungivorous Nematodes and Grower Participation. Doctoral Thesis, Université Suédoise des sciences agricoles, Uppsala, 41p.
- Izard D. (2011). La solarisation en maraîchage. *Les Techniques Alternatives*. Septembre 2011. 4p.

- Janvier C (2012). Gestion des bioagresseurs telluriques en cultures légumières, Prabioteel : un projet pour des solutions techniques. Infos CTIFL, 282 : 47-55.
- Kurle J. E., Grau C. R., Oplinger E. S., and Mengistu A. 2001. Tillage, crop sequence and cultivar effects on Sclerotinia stem rot incidence and yield in soybean. *Agronomy Journal* 93: 973-982.
- Labanowski J., (2004). Matière organique naturelle et anthropique : vers une meilleure compréhension de sa réactivité et de sa caractérisation. Doctorat Chimie et microbiologie de l'eau, Université de Limoges, Limoges, 209p.
- Labrada R., (2008). Alternatives to replace methyl bromide for soil-borne pest control in East and Central Europe – MANUAL. Food and Agriculture Organisation Of The United Nations. Rome, 2008
- Launais M., Bzdrenga L., Estorgues V., Faloya V., Jeannequin B., Lheureux S., Nivet L., Scherrer B., Sinoir N., Szilvasi S., Taussig C., Terrentroy A., Trottin-Caudal Y., Villeneuve F. (2014), Guide pratique pour la conception de systèmes de culture légumiers économes en produits phytopharmaceutiques, Ministère charge de l'Agriculture, Onema, GIS PICleg, 178p.
- Lavigne C., Ricci B., Franck P., Senoussi R. (2010). Spatial analyses of ecological count data : a density map comparison approach. *Basic and Applied. Ecology*. 11(8) : 734-742.
- Leplat H., Védie H., (2005). Les engrais verts en maraîchage biologique. TECHN'ITAB maraichage. 4p.
- Les cahiers de FranceAgrimer, les filières des fruits et légumes, données 2013. Edition provisoire juillet 2014. 91p.
- Lizot J-F., Mazollier C., (2000). Le désherbage par solarisation ou la vapeur. *Fiche technique désherbage en Maraichage et Plantes aromatiques médicinales biologiques*. 4p.
- Lopez-Herrera C.J. and Verdu-Valiente B (1994). Eradication of primary inoculum of *Botrytis cinerea* by soil solarization. *Plant Disease*. 78 (6):594-597
- Marguerie M. (2011). Diversification des cultures dans les exploitations maraîchères biologiques : conséquences sur les gestions agronomique et commerciale – cas de la basse vallée de Durance, PACA. Mémoire de fin d'étude pour l'obtention du diplôme d'ingénieur, production végétale durable, Montpellier SupAgro, Montpellier, 78p.
- Mazollier C. (2009). Les engrais verts d'été-automne dans le sud est en maraichage biologique : intérêt, choix des espèces et itinéraire cultural. *Ref bio maraichage PACA*. 4p.
- Mazoyer M., Bermond A., Bougler, J., Ney B. et Roger-Estrade J. (2002). Larousse agricole, Le monde paysan au XXI^e siècle 4^e édition, Larousse. Paris. 625p.
- Michel V., Ahmed H. et Dutheil A., (2007). La biofumigation, une méthode de lutte contre les maladies du sol. *Revue Suisse Viticulture Arboriculture Horticulture*. 39(2), pp. 145-150.
- Navarrete M., Tchamitchian M., Aissa Madani C., Collange B., Taussig C. (2010). Elaborating innovative solutions with experts using a multicriteria evaluation tool. The case of soil borne disease control in market – gardening cropping systems. COUDEL E., DEVAUTOUR H., SOULARD C-T., HUBERT B.. ISDA 2010, Jun 2010, Montpellier, France. Cirad-Inra-SupAgro, 10 p.
- Nolot J-M, Debaeke P. Principes et outils de conception, conduite et évaluation de systèmes de culture . *Cahiers Agricultures*. 2003;12(6):387-400.

- Oda M. (2002). Grafting of vegetable crops. *Sci Rep Agric & Biol Sci*. 54:49-72
- Papy F. (2008). Le système de culture : un concept riche de sens pour penser le futur. *Cahiers Agricultures*. 17, 3 : 263-269.
- Perrin R. (1985). L'aptitude des mycorhizes à protéger les plantes contre les maladies : panacée ou chimère ? *Annales des sciences forestières*. 42 (4) : 453-470.
- Peyrard N, Calonnec A., Bonnot F., Chadoeuf J. (2005) Explorer un jeu de données sur grille par tests de permutation. *Rev. Statistique Appliquée*, LIII (1), 59-78
- Pinkerton J.N., Mojtahedi H., Santo G.S., O'Bannon J.H. (1987). Vertical Migration of *Meloidogyne chitwoodi* and *M. hapla* under Controlled Temperature. *Journal of Nematology*, 19 : 152-157.
- Prot J-C. (1975). Recherches concernant le déplacement des juvéniles de *Meloidogyne* spp. vers les racines. *Cah. ORSTOM, série Biol.* 3 : 251-262.
- Prot, J.-C., Van Gundy, S.D., 1981. Effect of soil texture and the clay component on migration of *Meloidogyne incognita* second-stage juveniles. *Journal of Nematology*, 13 : 213-217.
- Pullman G.S., DeVay J.E. and Garber R.H.(1981). Soil solarization and thermal death: a logarithmic relationship between time and temperature for four soilborne plant pathogens. *Phytopathology* . 71:959-964
- Réau R., Bodet J-M., Bordes J-P., Bore T., Ennaifar S., Moussart A., Nicolardot B., Pellerin S., Plenchette C., Quinsac A., Sausse C., Seguin B., Tivoli B. (2005). Effets allélopathiques des Brassicacées via leurs actions sur les agents pathogènes telluriques et les mycorhizes : analyse bibliographique. Partie 1. OCL. 12, 3 :261-271.
- Ricci B., Franck P., Bouvier J-C., Casado D., Lavigne C. (2011). Effects of hedgerow characteristics on intra-orchard distribution of larval codling moth. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 140 :395–400
- Schneider R. and Gerlach W. (1966). *Pyrenochaeta lycopersici* nov. spec., der Erreger der Korkwurzelkrankheit der tomate. *PhytopathologischeZeitschrift*, 56:117-122.
- Sebillotte (1975) Système de culture, un concept opératoire pour les agronomes. In : Combe L. (Picard D.), Les systèmes de culture. Inra, Paris : 165-196
- Stapleton J.J. and Devay J.E.. (1986). Soil solarization: a non-chemical approach for management of plant pathogens and pests. *Crop protection*. 5,3:190-198.
- Serrurier M. (2013). Agreste : les dossiers. N°16 – juin 2013, 104p.
- Terrentroy A., Ginez A., Goillon C. (2014). Protection de la tomate sous abris. APREL. Octobre 2014. 32p.
- Trichard A., Ricci B., Ducourtieux C., Petit S. (2014). The spatio-temporal distribution of weed seed predation differs between conservation agriculture and conventional tillage. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 188 : 40–47
- Trottin-Caudal Y., Villeneuve F., Chabrière C., Dubois M. et Schoen L. (2006). Protection des cultures légumières sous abri et de plein champ – la prophylaxie et les méthodes de lutte indirecte – cas de la tomate et de la carotte. *Infos CTIFL*. 224 : 36-42.

Vanachter, A., Wambeke, E., & van Assche, C. (1998). In vitro evaluation of the antagonistic properties of *Trichoderma* spp. against *Pyrenochaeta lycopersici* and *Phomopsis sclerotoides*. Bulletin OEPP. EPPO Bulletin. European and Mediterranean Plant Protection Organization, 18, 1–7.

Védie H., Mazollier C., (2009). De nouvelles pistes pour gérer les nématodes à galles. *Bulletin d'information maraichage du GRAB*. 61, 6p

Védie H (2012). Des plantes moins sensibles à insérer dans les rotations pour diminuer les populations de nématodes à galles : résultats des essais du GRAB en zone méditerranéenne. *Bulletin d'information maraichage du GRAB*. 73, 4p.

Volay T (2009), ECOPHYTO R&D : vers des systèmes de culture économes en produits phytosanitaires, tome V : analyse comparative de différents systèmes en cultures légumières. INRA, 118 p.

Wang K.H., McSorley R. (2008). Exposure time to lethal temperatures for *Meloidogyne incognita* suppression and its implication for soil solarization. *Journal of Nematology*. 40:7-12.

White J. G., Scott A. C. (1972). Formation and ultrastructure of microsclerotia of *Pyrenochaeta lycopersici*. *Ann. Appl. Biol.* 73:163-166.

Whipps, J. M. (1997). Developments in the Biological Control of Soil-borne Plant. *Advances in botanical research*, 26 : 1-134

Wilson P.D. (2011), Distance-based methods for the analysis of maps produced by species distribution models. *Methods in Ecology and Evolution*, 2 : 623–633

Workneh F., Van Bruggen A. H. C., Drinkwater L. E. and Shennan C (1993). Variables associated with corky root and Phytophthora root rot of tomatoes in organic and conventional farms. *Phytopathology*. 83 : 581-589.

8. Sitographie

AGRESTE (2013). Typologie des exploitations agricoles des Pays de la Loire – Synthèse. <http://agreste.agriculture.gouv.fr/IMG/pdf/R5213A44.pdf>. [Consulté le 19/06/2015]

AGRESTE (2014). Pays de la Loire, Mémento de la statistique agricole. <http://agreste.agriculture.gouv.fr/IMG/pdf/R5214C01.pdf>. [Consulté le 18/03/2015]

CDDM. Le maraichage en Loire-Atlantique. <http://www.cddm.fr/page/le-mara%C3%A9chage-en-loire-atlantique>. [Consulté le 18/03/2015]

Chambre d'Agriculture de Loire-Atlantique. Le maraichage en Loire-Atlantique. <http://www.loire-atlantique.chambagri.fr/cultures-specialisees/maraichage.html>. [Consulté le 18/03/2015]

DEPHY (2013). Quoi de neuf dans les fermes DEPHY ?. [13/05/2013] / <http://agriculture.gouv.fr/Focus-sur-les-fermes-DEPHY>

De Werhier G (2012). Maraichage nantais : un dynamisme économique à maintenir. <http://www.pleinchamp.com/actualites-generales/actualites/maraichage-nantais-un-dynamisme-economique-a-maintenir>. [Consulté le 18/03/2015]

IBMA. Le biocontrôle : produire autrement. <http://www.ibmafrance.com/preacutesentation-geacuteneacuturale.html>. [Consulté le 15/06/2015]

Mollier P., (2012).Systèmes agricoles innovants : l'expérimentation système [03.03.2014] / <http://www.inra.fr/Chercheurs-etudiants/Systemes-agricoles/Tous-les-dossiers/experimentation-systeme>

Réseau PIC (24.01.2012). Le système d'information AGROSYST. / <http://www6.inra.fr/reseau-pic/Projets/Le-plan-Ecophyto-2018/Le-systeme-d-information-AGROSYST> [mis à jour le : 09.05.2012]

Annexes

Annexe I : PRABIOTEL : Gestion des bioagresseurs telluriques en cultures légumières

Coordinateur : Céline Ade

Centre Technique Interprofessionnel des Fruits et Légumes (Ctifl)

Mail : ade@ctifl.fr

Partenaires :

Ctifl, Sileban, GRAB, CDDM, Invénio, APREL, CETA Ste Anne, CETA Eyguières, CA 84, INRA, Altus

Mots clefs : pratiques améliorantes ; bioagresseurs telluriques ; réseau ; biofumigation ; solarisation

Résumé

Le projet Prabiotele, 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.



Couverture pour solarisation en planches de plein champ

Contexte et objectifs

Les systèmes de cultures légumières/maraichers en plein champ et sous abris froids se caractérisent par un niveau souvent élevé d'intensification des cultures, qui conduit à l'aggravation des problèmes liés aux bioagresseurs telluriques.

L'objectif principal de ce projet est de pouvoir proposer aux producteurs des solutions techniques pour une meilleure maîtrise des bioagresseurs telluriques, en limitant le recours aux produits phytosanitaires chimiques. Ces solutions techniques, axées sur la gestion des systèmes de culture et la combinaison des pratiques, doivent être fiables, économiquement viables et respectueuses de l'environnement, ceci tout en garantissant un haut niveau de production, en restant en accord avec les exigences du marché et de la société.

Méthodes

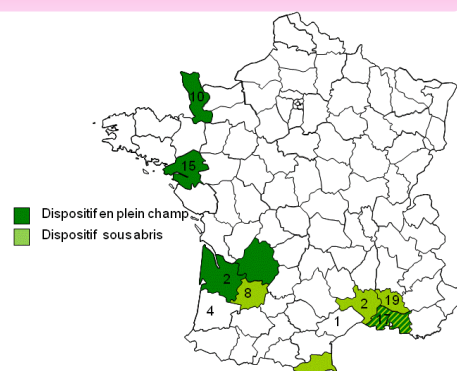
- ❖ Trois actions complémentaires et conduites en réseau
 - Réalisation d'enquêtes auprès des producteurs (Action 1)
 - Suivi d'itinéraires mettant en œuvre des pratiques améliorantes en conditions de production (Action 2) et en conditions de stations expérimentales (Action 3)

- ❖ Action 1 : enquête auprès des producteurs

Le sondage a été mené sous forme de questionnaire, avec pour objectif de faire un état des lieux de l'utilisation des pratiques sur le terrain et identifier les verrous et leviers pour faire évoluer la situation.

- ❖ Action 2 et 3 : expérimentations

L'ampleur géographique du réseau constitué par les partenaires a permis de couvrir une grande variabilité d'incidence des systèmes de culture ou des conditions pédoclimatiques sur l'efficacité des pratiques mises en œuvre. Cependant il a été décidé de travailler uniquement sur les systèmes intégrant des cultures de salades en hiver pour les abris, ou des cultures de poireau ou de carotte pour le plein champ. Ces cultures servent de références communes et sont sensibles au pool de maladies et de ravageurs les plus fréquents.



Localisation des actions 2 et 3 en plein champ

1. Les pratiques améliorantes testées, seules ou en combinaison, sont :
 - La solarisation consiste à utiliser l'énergie solaire afin de faire monter rapidement le sol en température par pose d'un paillage plastique.
 - La biodésinfection est basée sur la libération de substances, notamment celles issues de la dégradation de plantes après broyage et enfouissement, qui sont toxiques pour les bioagresseurs. Il s'ensuit une modification de la réceptivité des sols aux bioagresseurs. La moutarde brune (*Brassica juncea*) est un exemple de plante aux propriétés « biofumigantes », utilisé dans les différents systèmes de culture étudiés dans le projet..
 - La biosolarisation comporte l'introduction d'un engrais vert en vue d'une biodésinfection, suivie d'une solarisation
 - La diversification des cultures en été ou en hiver
 - L'apport de matière organique fraîche.

Principaux résultats obtenus et applications envisageables, lien au Plan Ecophyto

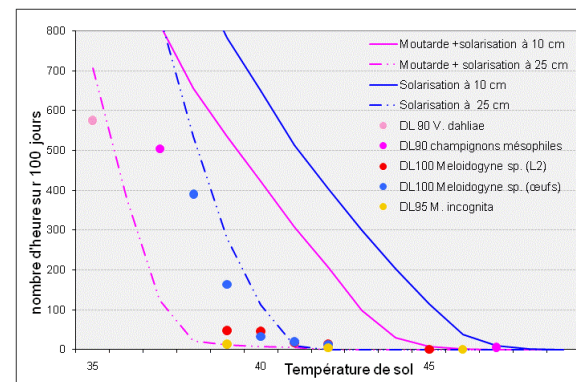
❖ Action 1 : enquête auprès des producteurs

Au total 78 producteurs ont été enquêtés dans la région ouest et sud-est. En plein champ, les pratiques améliorantes sont encore peu répandues. Seule la mise en place d'engrais verts est réalisée et ceci par 9 producteurs sur 42. En cultures sous-abris, ces pratiques sont plus largement développées avec l'implantation d'engrais verts mais aussi avec la pratique de la solarisation (la moitié des producteurs enquêtés).

❖ Action 2 et 3 : expérimentations

➤ Un bilan favorable pour la solarisation

Sous abri, la montée du sol en température s'est déroulée dans de bonnes conditions et ainsi des effets positifs ont été perçus contre les bioagresseurs telluriques (nématodes *Meloidogyne* spp, *Sclerotinia* sp., *Colletotrichum coccodes*, virus Big Vein (*Mirafiori* lettuce big-vein) mais aussi contre les adventices. Des interrogations demeurent quant à sa persistance d'action et à son effet sur l'équilibre du sol à long terme.



Nombre d'heures cumulées pour différentes température de sol lors d'une solarisation de 45 jours sous abri à Alénia (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 Alénia

➤ De nombreux acquis sur la biodésinfection/biosolarisation et l'apport de matière organique

L'efficacité de la biodésinfection ne ressort pas de manière significative à l'issue des trois ans de Prabiote. Une amélioration de la situation sanitaire de la culture a en effet été observée dans certains cas (pathosystèmes *R. solani*/pomme de terre primeur, *P. sulcatum*/carottes avec le mélange vesce +seigle en hiver), mais ceci reste variable et encore à démontrer. La biosolarisation pourrait s'avérer plus efficace, notamment sous abri et en combinant les deux effets. Par ailleurs, l'intérêt agronomique de l'implantation d'engrais verts en interculture ou bien l'apport de matière organique est lui bien réel (rôle sur la fertilité des sols...).

➤ La diversification des cultures et l'insertion de plantes non-hôtes

La rotation des cultures est efficace pour prévenir l'apparition de problèmes telluriques : nématodes, *Sclerotinia*, corky root... L'insertion de plantes non-hôtes à des agents pathogènes donnés, induit une réduction de l'inoculum de ces agents sur des sites très infestés. C'est donc une technique intéressante mais lourde à gérer financièrement.

Perspectives et conclusion

La solarisation sous abri et la mise en place d'engrais vert en plein champ ou sous abri sont des pratiques qu'il est réellement possible de mettre en œuvre dans les systèmes de cultures, à condition de raisonner leur utilisation et de les adapter en fonction des bioagresseurs ciblés, des cultures et des créneaux de mise en place. Des questions subsistent : notamment la persistance d'action de ces pratiques, le coût de leur mise en œuvre ... etc. Ainsi le projet GEDUBAT Expé Ecophyto, Innovations techniques et variétales pour une GEstion DURable des BioAgressseurs Telluriques dans les systèmes maraîchers sous abris (2012-2017), tentera de répondre à ces questions, afin de valider l'efficacité à moyen et plus long terme de différentes pratiques améliorantes en combinaison dans des systèmes de culture sous abri et permettant une réduction globale de l'utilisation de produits phytopharmaceutiques (Plan Ecophyto 2018).

Références bibliographiques du projet

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.

Motisi N. *et al*, 2010. [Dealing with the variability in biofumigation efficacy through an epidemiological framework](#). Soil Biology and Biochemistry, 42-12, pp. 2044-2057.

Janvier C., 2012, Prabioteel : un projet pour de solutions techniques – Gestion des bioagresseurs telluriques en cultures légumières, Infos-Ctifl, n°282, pp. 47-55.

Annexe II : Sorties du logiciel R

ANOVA sur les INR - Site de Carquefou

Parcelle M2O

```
> .anova.menu(nb.fact=1)
```

RESUME DES DONNEES, selon le facteur date :

date	Nombre d'observations	Moyenne	Variance	Minimum	Maximum
2012	45	0.289	1.846	0	7
2013	60	2.246	4.72	0	7
2014	60	0.538	0.971	0	5

ETUDE DES RESIDUS :

	Nombre d'obs.	Minimum	1er quartile	Mediane	3e quartile	Maximum
Résidus	165	-2.246	-0.538	-0.289	0.462	6.711
	Moyenne	Variance	Ecart type			
Résidus	-2.51e-17	2.56	1.6			

Normalité des résidus : test de Shapiro-Wilk

	Statistique	p-valeur
Shapiro-Wilk	0.817	1.56e-13

Homoscédasticité des résidus

	Statistique	p-valeur
Test de Bartlett	38.942	3.5e-09

Conditions d'application de l'Anova non respectées: on fait un test non paramétrique

TESTS NON PARAMETRIQUES :

Comparaison des médianes : test de Kruskal-Wallis

	Statistique	p-valeur
Kruskal-Wallis	48.601	2.8e-11

date COMPARAISONS MULTIPLES basées sur les rangs (alpha : 0.05)
(plus petite différence significative : 13.953)
Moyenne harmonique du nombre d'observations par niveau 56.6129

facteur	Nombre d'observations	Moyenne des rangs	Groupe
2013	60	116.723	a
2014	60	78.546	b
2012	45	60.167	c

Parcelle M2E

```
> .anova.menu(nb.fact=1)
```

RESUME DES DONNEES, selon le facteur date :

date	Nombre d'observations	Moyenne	Variance	Minimum	Maximum
2012	45	0.111	0.556	0	5
2013	60	1.917	5.162	0	7
2014	60	0.1	0.125	0	2

ETUDE DES RESIDUS :

	Nombre d'obs.	Minimum	1er quartile	Mediane	3e quartile	Maximum	Moyenne
Résidus	165	-1.917	-0.111	-0.1	-0.1	5.083	6.86e-18
		Variance	Ecart type				
Résidus		2.051	1.432				

Normalité des résidus : test de Shapiro-Wilk

	Statistique	p-valeur
Shapiro-Wilk	0.718	1.94e-16

Homoscédasticité des résidus

	Statistique	p-valeur
Test de Bartlett	168.478	2.6e-37

Conditions d'application de l'Anova non respectées: on fait un test non paramétrique

TESTS NON PARAMETRIQUES :

Comparaison des médianes : test de Kruskal-Wallis

	Statistique	p-valeur
Kruskal-Wallis	51.711	5.9e-12

date COMPARAISONS MULTIPLES basées sur les rangs (alpha : 0.05)
(plus petite différence significative : 11.144)
Moyenne harmonique du nombre d'observations par niveau 54

facteur	Nombre d'observations	Moyenne des rangs	Groupe
2013	60	109.017	a
2014	60	69.683	b
2012	45	66.067	b

M1E:

L'intégralité des notes de nécrose racinaire étant nulles, on ne peut pas appliquer l'Anova.

M1O:

```
> .anova.menu(nb.fact=1)
```

RESUME DES DONNEES, selon le facteur date :

date	Nombre d'observations	Moyenne	Variance	Minimum	Maximum
2012	45	0	0	0	0
2013	60	0.277	1.61	0	6

ETUDE DES RESIDUS :

	Nombre d'obs.	Minimum	1er quartile	Mediane	3e quartile	Maximum
Résidus	105	-0.277	-0.277	-0.277	-1.28e-16	5.723
	Moyenne	Variance	Ecart type			
Résidus	-1.27e-17	0.945	0.972			

Normalité des résidus : test de Shapiro-Wilk

	Statistique	p-valeur
Shapiro-Wilk	0.237	2.33e-21

Homoscédasticité des résidus

	Statistique	p-valeur
Test de Bartlett	Inf	0

Conditions d'application de l'Anova non respectées: on fait un test non paramétrique

TESTS NON PARAMETRIQUES :

Comparaison des médianes : test de Kruskal-Wallis

	Statistique	p-valeur
Kruskal-Wallis	2.116	0.146

Les moyennes sont égales

Parcelle C3

```
> .anova.menu(nb.fact=1)
```

RESUME DES DONNEES, selon le facteur date :

date	Nombre d'observations	Moyenne	Variance	Minimum	Maximum
13/06/2014	60	5.7	8.858	0	10
16/07/2013	60	1.533	2.389	0	7
18/06/2012	60	7.35	6.096	2	10
19/02/2013	60	0.7	0.485	0	2
24/02/2014	60	4.241	3.906	0	8
26/01/2015	60	0.833	0.819	0	3

ETUDE DES RESIDUS :

	Nombre d'obs.	Minimum	1er quartile	Mediane	3e quartile	Maximum	Moyenne
Résidus	358	-5.7	-0.833	0.167	1.3	5.467	3.5e-17
	Variance	Ecart type					
Résidus	3.705	1.925					

Normalité des résidus : test de Shapiro-Wilk

	Statistique	p-valeur
Shapiro-Wilk	0.986	0.00181

Homoscédasticité des résidus

	Statistique	p-valeur
Test de Bartlett	155.073	1.11e-31

TESTS NON PARAMETRIQUES :

Comparaison des médianes : test de Kruskal-Wallis

	Statistique	p-valeur
Kruskal-Wallis	232.978	2.46e-48

date COMPARAISONS MULTIPLES basées sur les rangs (alpha : 0.05)
 (plus petite différence significative : 21.888)
 Moyenne harmonique du nombre d'observations par niveau 59.65714

facteur	Nombre d'observations	Moyenne des rangs	Groupe
18/06/2012	60	295.733	a
13/06/2014	60	255.192	b
24/02/2014	60	225.259	c
16/07/2013	60	124.475	d
26/01/2015	60	91.967	e
19/02/2013	60	85.9	e

Parcelle C4

```
> .anova.menu(nb.fact=1)
```

RESUME DES DONNEES, selon le facteur date :

date	Nombre d'observations	Moyenne	Variance	Minimum	Maximum
13/06/2014	60	4.068	4.857	1	10
16/07/2013	60	1.167	2.345	0	7
18/06/2012	60	6.917	6.383	2	10
19/02/2013	60	0.65	0.74	0	4
21/01/2015	60	1.3	1.163	0	5
24/02/2014	60	4.467	3.236	1	8

ETUDE DES RESIDUS :

	Nombre d'obs.	Minimum	1er quartile	Mediane	3e quartile	Maximum	Moyenne	Variance	Ecart type
Résidus	359	-4.917	-1.167	-0.3	0.932	5.932	-4.24e-17	3.072	1.753

Normalité des résidus : test de Shapiro-Wilk

	Statistique	p-valeur
Shapiro-Wilk	0.979	3.56e-05

Homoscédasticité des résidus

	Statistique	p-valeur
Test de Bartlett	88.865	1.16e-17

TESTS NON PARAMETRIQUES :

Comparaison des médianes : test de Kruskal-Wallis

	Statistique	p-valeur
Kruskal-Wallis	235.37	7.55e-49

date COMPARAISONS MULTIPLES basées sur les rangs (alpha : 0.05)
(plus petite différence significative : 21.769)
Moyenne harmonique du nombre d'observations par niveau 59.83099

facteur	Nombre d'observations	Moyenne des rangs	Groupe
18/06/2012	60	300.442	a
24/02/2014	60	247.942	b
13/06/2014	60	230.89	b
21/01/2015	60	118.083	c
16/07/2013	60	104.158	c
19/02/2013	60	79.333	d

Parcelle C5 :

```
> .anova.menu(nb.fact=1)
```

RESUME DES DONNEES, selon le facteur date :

date	Nombre d'observations	Moyenne	Variance	Minimum	Maximum
13/06/2014	60	3.767	9.368	0	10
16/07/2013	60	0.883	1.291	0	7
18/06/2012	60	5.975	6.128	1	9
19/02/2013	60	0.583	0.349	0	2
21/01/2015	60	1.367	1.999	0	5
24/02/2014	60	3.271	4.753	0	8

ETUDE DES RESIDUS :

	Nombre d'obs.	Minimum	1er quartile	Mediane	3e quartile	Maximum	Moyenne	Variance	Ecart type
Résidus	339	-4.975	-0.975	-0.271	0.877	6.233	-1.43e-17	3.793	1.948

Normalité des résidus : test de Shapiro-Wilk

	Statistique	p-valeur
Shapiro-Wilk	0.965	2.72e-07

Homoscédasticité des résidus

	Statistique	p-valeur
Test de Bartlett	160.838	6.56e-33




TESTS NON PARAMETRIQUES :

Comparaison des médianes : test de Kruskal-Wallis

	Statistique	p-valeur
Kruskal-Wallis	156.878	4.58e-32

date COMPARAISONS MULTIPLES basées sur les rangs (alpha : 0.05)
(plus petite différence significative : 26.393)
Moyenne harmonique du nombre d'observations par niveau 55.24057

facteur	Nombre d'observations	Moyenne des rangs	Groupe
18/06/2012	60	281.5	a
13/06/2014	60	219.925	b
24/02/2014	60	218.119	b
21/01/2015	60	137	c
16/07/2013	60	109.5	d
19/02/2013	60	91.925	d

  		Diplôme / Mention : Master 2 Spécialité : Production et Technologie du Végétal (ProTeV) Parcours : Productions Végétales Spécialisées Option : Produits phytosanitaires, réglementation, méthodes alternatives
Auteur(s) : Claire TEXIER Date de naissance* : 27/05/1991		Organisme d'accueil : CTIFL - Carquefou Adresse : 35 allée des Sapins ZI Belle Étoile Antarès 44483 CARQUEFOU Cedex
Nb pages : 34	Annexe(s) : 2	Maître de stage : Céline ADE
Année de soutenance : 2015		
Titre français : Approche intégrée de la protection des cultures maraîchères sous abris contre les bioagresseurs telluriques. Titre anglais : Integrated approach to the protection of vegetable crops under shelters against telluric bioagressors		
<p>Résumé :</p> <p>Dans le contexte actuel de restriction de l'usage des produits phytosanitaires, la gestion des bioagresseurs telluriques en maraîchage sous abris est préoccupante. Il existe des techniques alternatives à ces produits mais leur efficacité et leur combinaison n'avaient pas encore été étudiées. C'est dans ce cadre que le projet GEDUBAT (Innovations techniques et variétales pour une GESTION DURable des BioAgresseurs Telluriques dans les systèmes maraîchers sous abris) mené par le CTIFL a été créé pour réfléchir à la conception de systèmes de culture innovants. Il s'agit ici d'évaluer à moyen et à long terme l'effet de ces combinaisons de pratiques améliorantes sur un cortège de bioagresseurs les plus fréquents, pour lesquels le recours à des traitements de sol ou en culture est encore très répandu.</p> <p>L'évolution des attaques de bioagresseurs et leur structuration spatiale ont été étudiées au sein du site du CTIFL de Carquefou ainsi que sur le site de l'APREL. Les bioagresseurs étudiés sont le champignon <i>Pyrenochaeta lycopersici</i> et le nématode <i>Meloidogyne</i> sp respectivement pour les deux sites. Différentes stratégies sont conduites sur ces deux sites et reposent sur l'utilisation de produits de biocontrôle, la solarisation, la diversification des cultures, l'utilisation d'engrais verts, l'apport de matière organique...</p> <p>Pour le moment la diversification des cultures et l'apport de matière organique permettent de limiter la progression des bioagresseurs telluriques sur des parcelles avec des taux d'infestation faibles. Néanmoins, sur des parcelles fortement infestées les différentes stratégies conduites ne montrent pas d'effet significatif.</p>		
<p>Abstract :</p> <p>In the current context of the restriction of the pesticides use, management of telluric pests and diseases in vegetable production under shelter is worrying. There are alternative techniques for these products but their effectiveness and their combination had not been studied. It is in this situation that the GEDUBAT project (technical and varietal innovations for sustainable management of telluric pests in vegetable production under shelter) led by CTIFL was established to consider the design of innovative cropping systems. Here, it is a question of assessing in medium and long term the effect of these combinations of alternative practices against a range of common pests for which treatments of soil or in culture are still very wide-spread.</p> <p>The evolution of pests' attacks and their spatial structuration have been studied within the CTIFL of Carquefou and on the site of the APREL was performed. The pests studied are: the fungus <i>Pyrenochaeta lycopersici</i> and the nematode <i>Meloidogyne</i> sp respectively for both. Different strategies have been conducted on these sites and rely on the use of biocontrol products, soil solarisation, crop diversification, use of green manure, supply of organic matter...</p> <p>For the moment, crop diversification and supply of organic matter can limit the growth of telluric pest on low infested plots. Nevertheless, on high infested plots the different strategies used do not show significant effect.</p>		
Mots-clés : système de culture, structuration spatiale, pratiques alternatives, <i>Meloidogyne</i> sp, <i>Pyrenochaeta lycopersici</i> . Key Words: cropping system, spatial structuration, alternative techniques, <i>Meloidogyne</i> sp, <i>Pyrenochaeta lycopersici</i> .		

