



HAL
open science

Construction et validation d'un outil d'évaluation multicritère de systèmes de culture en maraîchage sous abri froid vis-à-vis de la gestion des bioagresseurs telluriques

Quentin Bages

► **To cite this version:**

Quentin Bages. Construction et validation d'un outil d'évaluation multicritère de systèmes de culture en maraîchage sous abri froid vis-à-vis de la gestion des bioagresseurs telluriques. Sciences du Vivant [q-bio]. 2011. hal-02805704

HAL Id: hal-02805704

<https://hal.inrae.fr/hal-02805704>

Submitted on 6 Jun 2020

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

VetAgro Sup

Mémoire de fin d'études d'ingénieur

Construction et Validation d'un outil
d'évaluation multicritère de systèmes de
culture en maraîchage sous abri froid vis-à-vis
de la gestion des bioagresseurs telluriques

Quentin BAGES
Agronomie Productions Végétales et Environnement
Septembre 2011

VetAgro Sup

Mémoire de fin d'études d'ingénieur

Construction et Validation d'un outil
d'évaluation multicritère de systèmes de
culture en maraîchage sous abri froid vis-à-vis
de la gestion des bioagresseurs telluriques

Quentin BAGES
Agronomie Productions Végétales et Environnement
Septembre 2011

Maître de stage : Marc TCHAMITCHIAN
Tuteur : Mathieu CAPITAINE

« L'étudiant conserve la qualité d'auteur ou d'inventeur au regard des dispositions du code de la propriété intellectuelle pour le contenu de son mémoire et assume l'intégralité de sa responsabilité civile, administrative et/ou pénale en cas de plagiat ou de toute autre faute administrative, civile ou pénale. Il ne saurait, en cas, seul ou avec des tiers, appeler en garantie VetAgro Sup. »

REMERCIEMENTS

Je tiens tout d'abord à remercier mon maître de stage Marc Tchamitchian pour son aide, ses précieux conseils, la clarté de ses explications, sa disponibilité et sa grande sympathie qui ont contribué au déroulement de mon stage dans des conditions agréables.

Merci aux conseillers techniques en maraîchage que j'ai eu l'occasion de rencontrer au cours d'entretien, de m'avoir toujours bien reçu et de m'avoir accordé du temps dans leur emploi du temps chargé en début de période estivale.

Merci à Mathieu Capitaine, mon tuteur pour ses conseils avisés.

Je tiens également à remercier l'ensemble des membres de l'unité d'écodéveloppement de l'INRA d'Avignon, pour leur accueil et leur sympathie, pour l'ambiance agréable régnant dans l'unité, pour les petits apéritifs en plein air, les parties de pétanque du midi...

Je remercie aussi les stagiaires présents comme moi dans l'unité pour la convivialité et les bons moments passés entre Michel. Un grand merci à Michel Didier, mon collègue de bureau pour sa bonne humeur et son sens de l'humour hors du commun.

Enfin, merci à mes proches qui m'ont toujours soutenu.

Résumé

Ces dernières années, le durcissement de réglementation concernant l'utilisation des pesticides, lié à la prise de conscience des risques environnementaux et sanitaires de certains produits, entraîne progressivement leur interdiction d'utilisation. Les produits de désinfection du sol comme le bromure de méthyle, très utilisés dans les systèmes maraichers du Sud Est de la France pour lutter contre les bioagresseurs telluriques, sont aujourd'hui interdits d'utilisation. Cette disparition des produits de désinfection du sol amène actuellement les producteurs maraichers à reconcevoir leurs systèmes de culture en mobilisant des techniques alternatives aux traitements chimiques pour contrôler les bioagresseurs telluriques dans les abris. Dans ce contexte, un projet mêlant chercheurs et conseillers techniques est conduit à l'INRA d'Avignon, pour réfléchir à la conception de systèmes de culture innovants.

Ce travail, consiste en la mise au point (construction et validation) d'un outil de support à la réflexion sur des prototypes de systèmes innovants combinant différentes techniques alternatives de gestion des bioagresseurs, qui sera utilisé dans le processus de co-conception. Cet outil est basé sur un modèle d'évaluation multicritère et qualitatif permettant l'évaluation de systèmes de culture en maraîchage sous abri froid vis-à-vis de la gestion de plusieurs bioagresseurs telluriques. L'outil une fois mis au point sera utilisé pour sélectionner des prototypes de systèmes innovants prometteurs qui pourront être testés en parcelles expérimentales.

La construction et la validation du modèle d'évaluation multicritère s'est faite en mobilisant diverses sources de connaissances. La construction est assurée en mobilisant l'expertise de conseillers techniques afin de compléter des connaissances scientifiques parfois lacunaires sur les techniques alternatives de gestion des bioagresseurs.

La validation du modèle à la fois multicritère et qualitatif s'appuie sur une méthode de validation visant à la recherche de cohérence entre les sorties qualitatives du modèle et la réalité du « terrain » décrite à partir de données d'observation ou de l'expertise de conseillers techniques. Des méthodes de construction et de validation d'un modèle d'évaluation multicritère et qualitatif sont donc proposées dans ce travail. Ce travail amène à s'interroger sur la démarche de construction et de validation d'un outil d'évaluation multicritère et qualitatif ainsi que sur l'intérêt de l'utilisation d'un outil d'évaluation multicritère et qualitatif dans le processus de co-conception de systèmes de culture.

Mots clés : analyse multicritère, validation qualitative, systèmes de culture, maraîchage sous abri, contrôle des pathogènes

Abstract

These last years, the hardening of regulation concerning the use of pesticides, bound to the awareness of the environmental and sanitary risks of some products, progressively lead to a banning of use. Pre-plant soil treatments as Methyl Bromide, very used in market gardening cropping systems of South East of France to provide some control of soil-borne diseases and pests, are currently forbidden. This disappearance of pre-plant soil treatments makes that farmers modify their cropping systems mobilizing different alternative techniques to provide some control of soil-borne pests. In this context, a project mixing scientists and professionals specialized in market gardening is carried out at the INRA of Avignon, to lead a reflection about the building of innovative cropping systems.

This work consists in developing (construction and validation) a reflection support tool to lead a reflection about prototype of innovative cropping system combining different alternative techniques to fight soil-borne diseases, which will be used in a co-building process. This tool is based on a qualitative multicriteria evaluation model enabling to evaluate the market gardening cropping system ability to control soil-borne pests.

Once finalized, this tool will be used to select prototypes of promising innovative cropping systems which can be tested in experimental plots. The construction and validation of the multicriteria evaluation model was made by mobilizing various sources of knowledge. The model construction is warranted by mobilizing the expertise of technical advisers to complete occasionally incomplete scientific knowledge on the alternative techniques of soil-borne pests management.

The model validation at the same time multicriteria and qualitative is based on a validation method aiming at the research for coherence between the qualitative outputs of the model and the reality described from observation data or expertise. Construction and validation methods of evaluation multicriterion and qualitative model are thus proposed in this report. This work raises questions about the construction and validation approach of a qualitative multicriteria model and about the interest of the use of a multicriteria assessment tool in the Co-building process.

Key words : multicriteria analysis, qualitative validation, cropping system, market gardening , pest control

Table des matières

Introduction	1
Partie 1 : Contexte et Problématique	3
I) Un contexte amenant à la réflexion sur des systèmes de culture innovants pour gérer les bioagresseurs telluriques en maraîchage sous abri	3
I.1) La démarche de co-conception de systèmes de culture innovants	3
I.2) Thématique de travail et problématique	4
II) Le cas particulier étudié : le maraîchage sous abri froid en région PACA	5
II.1) Des systèmes de culture intensifs et spécialisés	5
II.2) Le développement des ravageurs et maladies telluriques dans les abris provençaux.....	6
II.3) Vers des pratiques alternatives de gestion des bio agresseurs telluriques	10
.Partie 2 : Matériel et Méthodes	13
I) Utilisation du logiciel DEXi pour construire un outil d'évaluation multicritère.....	13
I.1) Présentation du logiciel DEXi.....	13
I.2) Principe de l'arbre d'évaluation dans DEXi	14
I.3) Le fonctionnement de l'arbre d'évaluation (Figure 9).	14
II) Les étapes de construction de l'arbre d'évaluation multicritère.....	15
II.1) Un premier arbre d'évaluation basé sur la littérature scientifique	15
II.2) La confrontation de l'arbre d'évaluation avec les experts.....	17
III) La phase de validation de l'outil d'évaluation construit	19
III.1) Validation de l'outil d'évaluation à partir de données issues du « terrain »	19
III.2) Validation du fonctionnement du modèle d'évaluation final par un groupe d'experts lors d'une réunion finale	24
Partie 3 : Résultats	26
I) Phase de construction : Les modifications apportées à la structure par confrontation de l'arbre d'évaluation avec les experts	26

I.1) Remise en question d'éléments intégrés dans l'arbre et issus de la littérature scientifique par l'expérience et les connaissances des acteurs de « terrain »	26
I.2) Avis des experts confortant la structure de l'arbre théorique.....	27
I.3) Apports d'éléments par les experts absents dans la littérature scientifique	28
I.4) Apports d'éléments manquants dans la structure de l'arbre par les conseillers techniques et décrits dans la littérature scientifique.....	28
I.5) Cas où des informations sont absentes dans la littérature scientifique et où les conseillers ne peuvent pas apporter d'informations supplémentaires.	29
II) Phase de validation de l'outil	29
II.1) Résultats de la confrontation des données d'observations et d'enquêtes avec les sorties de l'outil	29
II.2) Résultats d'évaluation avec les modèles de systèmes de culture connus des conseillers (Réunion de validation finale).....	33
Partie 4 : Discussion	36
I) Discussion sur la démarche de construction et de validation du modèle d'évaluation multicritère et qualitatif	36
I.1) La démarche de confrontation de l'arbre théorique d'évaluation à l'avis de conseillers techniques	36
I.2) Critique de la méthode de validation de l'outil par les données de terrain	37
I.3) Discussion sur la validation par le groupe d'experts.....	38
I.4) L'utilisation de la complémentarité des sources de connaissances pour construire et valider le modèle d'évaluation	39
II) Les perspectives d'utilisation de l'outil d'évaluation des systèmes de culture mis en place....	40
II.1) L'outil d'évaluation facilite la démarche de co-conception de système de culture innovants	40
II.2) D'autres utilisations possibles	41
Conclusion.....	42
Bibliographie	43

TABLES DES ILLUSTRATIONS

• Figures

Figure 1: Schéma de la démarche de co-conception de systèmes de culture innovants	3
Figure 2: Localisation géographique de la région PACA.....	4
Figure 3: Carte de Provence	4
Figure 4: Schéma du cycle de développement de nématode à galles <i>Meloidogyne spp.</i>	7
Figure 5: Schéma du cycle de développement de <i>Sclerotinia spp.</i>	8
Figure 6: Schéma du cycle de développement de <i>Botrytis cinerea</i>	9
Figure 7: Structure d'une fonction d'utilité sous DEXi	14
Figure 8: Exemple d'une table de contingence	14
Figure 9: Schéma du fonctionnement du modèle d'évaluation multicritère	14
Figure 10: Cycle théorique regroupant des traits communs aux cycles des différents bioagresseurs	15
Figure 11: Exemple de carte d'infestation en nématodes à galles sur melon.....	21
Figure 12: Exemple de carte d'infestation en champignons du collet sur salades	21
Figure 13: Dendrogramme représentant la CAH des tunnels	21
Figure 14: Classification des tunnels selon les indices moyens d'infestation	21
Figure 15: Classification à 4 niveaux selon les niveaux d'infestation en bioagresseurs.....	22
Figure 16: Histogramme représentant les évaluations de la qualité sanitaire des 28 systèmes de culture...	29
Figure 17: Distribution de fréquence des valeurs de l'indice de concordance global	33

• Tableaux

Tableau 1: Liste des experts rencontrés.....	17
Tableau 2: Infestations moyennes en nématodes à galle et en champignons par tunnel.....	21
Tableau 3 : Confrontation des niveaux d'infestation selon la classification et des évaluations de la qualité sanitaire par système de culture	33
Tableau 4: codage des valeurs qualitatives en valeurs numériques utilisables dans R	33

Introduction

Les risques environnementaux et sanitaires liés à l'utilisation de produits chimiques de traitement en agriculture ont fait l'objet d'une véritable prise de conscience politique et citoyenne ces dernières années. Les effets néfastes avérés de certains produits phytosanitaires sur l'environnement naturel et sur la santé humaine ont conduit à un durcissement de la réglementation quant à leur utilisation dont le programme Ecophyto 2018¹ en est une illustration. A l'heure actuelle, la raréfaction de certains moyens de lutte chimique à laquelle s'ajoute l'augmentation des prix des intrants chimiques liée à la croissance des coûts des matières premières, amène le monde agricole à repenser les systèmes de culture² et à les modifier en y intégrant des pratiques alternatives aux traitements chimiques.

A travers ce travail, nous aborderons le cas particulier des systèmes intensifs de maraîchage sous abri en Provence qui connaissent à l'heure actuelle de profonds changements liés à la disparition de nombreux produits phytosanitaires de désinfection des sols. Les producteurs maraîchers provençaux ont contrôlé pendant plusieurs années les populations de bioagresseurs telluriques et notamment les nématodes phytoparasites par la désinfection chimique des sols. Cette pratique consistait à pulvériser dans le sol des fumigants chimiques, à l'interculture dans des tunnels vides. Le fumigant le plus largement utilisé était le bromure de méthyle. L'utilisation de ce gaz a été progressivement réduite ces dix dernières années et complètement interdite pour tout type de cultures à partir de mars 2010 (CE n° 1005/2009), à la suite de la mise en œuvre du protocole de Montréal³, car ce gaz en rejoignant la haute atmosphère endommageait fortement la couche d'ozone.

D'autres produits de traitements du sol utilisés jusqu'à présent par les agriculteurs (DORLONE 2000[®], TELONE 2000[®] et le DD 92[®] contenant du 1,3 dichloropropène) assez efficaces pour éliminer les nématodes à galle vont être prochainement interdits de mise en marché suite à une décision prise par la Commission Européenne⁴ du fait de la présence de 1,3 dichloropropène présentant des risques avérés pour la santé humaine et entraîne des contaminations potentielles des nappes d'eaux souterraines.

¹ Ecophyto 2018 : le plan Ecophyto 2018 a été mis en place à la suite du Grenelle de l'environnement et s'inscrit dans une stratégie plus globale au niveau européen (paquet pesticides). Il vise à répondre à l'objectif très ambitieux de réduire, si possible, l'utilisation des produits phytosanitaires de 50 % d'ici 2018, tout en maintenant un niveau de production agricole élevé.

² Système de culture : La définition de système de culture la plus couramment utilisée est celle de Sebillotte (1990): « L'ensemble des modalités techniques mise en œuvre sur des parcelles traitées de manière identique. Chaque système de culture se définit par (i) la nature des cultures et leur ordre de succession, (ii) les itinéraires techniques appliqués à ces différentes cultures, ce qui inclut le choix des variétés pour les cultures retenues ».

³ Protocole de Montréal : Ce protocole correspond à un accord international visant à réduire de moitié des substances qui appauvrissent la couche d'ozone. Il a été signé par 24 pays et par la Communauté Economique Européenne en Septembre 1987.

⁴ Le 20 janvier 2011, la Commission Européenne a pris la décision de ne pas inscrire le 1,3 dichloropropène à l'annexe I de la directive 91/414/CE.

La disparition progressive des produits de traitement des sols dans les systèmes maraichers intensifs de Provence, amène donc les producteurs à s'orienter vers des pratiques alternatives à l'utilisation des produits chimiques pour lutter contre les bioagresseurs telluriques dans les abris.

Mon stage de fin d'études au sein de l'INRA d'Avignon (Unité d'écodéveloppement-INRA SAD) s'inscrit dans ce contexte de développement de systèmes de culture innovants intégrant des pratiques culturelles alternatives pour gérer les ravageurs et maladies telluriques en maraichage sous abri.

Ce travail a consisté en la mise au point d'un outil d'évaluation multicritère des systèmes de culture en maraichage sous abri froid vis-à-vis de la gestion de plusieurs bioagresseurs telluriques. Cette mission qui m'a été confiée s'intègre dans un projet de co-conception de systèmes de culture innovants en maraichage sous abri en région Sud-Est, mobilisant à la fois des acteurs de la Recherche et du Développement. L'outil une fois créé doit permettre l'évaluation *ex ante* de prototypes de systèmes de culture et la sélection de systèmes innovants candidats pour l'expérimentation en conditions réelles. Cet outil d'évaluation sera un outil de support à la réflexion et à la discussion dans le cadre de réunions de co-conception. Ce travail de conception et de validation d'un outil d'évaluation facilitant la discussion et la prise de décision, sera réalisé notamment en mobilisant des connaissances provenant de la littérature scientifique, de suivis expérimentaux et de conseillers détenant un savoir issu directement de leurs expériences du « terrain ».

Dans un premier temps, seront présentés le contexte et les objectifs du travail de construction et de validation d'un outil permettant l'évaluation de systèmes de culture en maraichage sous abri froid vis-à-vis de la gestion de plusieurs bioagresseurs telluriques. Au sein de cette première partie, nous présenterons également brièvement le cas particulier des systèmes maraichers sous abri en Provence dont l'outil d'évaluation multicritère construit permettra l'analyse.

Dans une seconde partie, la méthodologie mise en œuvre pour construire et valider l'outil d'évaluation sera détaillée. Les résultats issus des processus de construction et de validation de l'outil seront présentés dans une troisième partie. Enfin une dernière partie permettra de discuter sur des résultats obtenus, de la pertinence de la méthode utilisée et de la question de l'utilité d'un outil d'évaluation multicritère qualitatif dans un processus de co-conception de systèmes de culture innovants.

Partie 1 : Contexte et Problématique

I) Un contexte amenant à la réflexion sur des systèmes de culture innovants pour gérer les bioagresseurs telluriques en maraîchage sous abri

I.1) La démarche de co-conception de systèmes de culture innovants

Le besoin émergent de reconception des systèmes de culture maraichers permettant la gestion des bioagresseurs telluriques par des techniques alternatives aux traitements de désinfection chimique du sol a conduit à la mise en place, par deux chercheurs de l'INRA d'Avignon (Unité d'Ecodéveloppement-SAD), d'une démarche de conception participative permettant de mener un travail de réflexion et de prospection sur des systèmes de culture innovants. Cette démarche a pour but de favoriser la création de systèmes de culture innovants sur la base de techniques alternatives aux traitements chimiques et de leurs combinaisons.

Cependant, au vue de la littérature existante de nombreuses connaissances du champ scientifique sur les différentes techniques alternatives de gestion des bioagresseurs restent à acquérir. Il est donc nécessaire de combiner des connaissances scientifiques encore lacunaires et des connaissances expertes issues de l'observation du terrain pour mener la démarche de conception. On parle d'ailleurs de co-conception du fait de la combinaison de connaissances scientifiques et expertes qui sont dans cette démarche.

La co-conception consiste donc à mêler des acteurs d'horizons différents, chercheurs et conseillers techniques pour mener une réflexion sur des systèmes de culture innovants. Cette démarche se décompose en plusieurs étapes clés (Figure 1); (i) tout d'abord un groupe d'experts qui dans notre cas est constitué de conseillers techniques définit un cahier des charges pour différents types d'exploitations agricoles comprenant des contraintes spécifiques (ex : longueur du créneau disponible à l'interculture pour réaliser des techniques alternatives); (ii) les chercheurs pilotant le projet proposent alors des prototypes de systèmes de culture combinant des techniques intéressantes pour gérer les bioagresseurs telluriques ; (iii) Des évaluations de prototypes de systèmes de culture sont ensuite effectuées *ex ante* par un outil d'évaluation et les évaluations obtenues des différents prototypes sont présentées au groupe d'experts ; (iv) les discussions entre le groupe d'experts (conseillers techniques) et les chercheurs sur les évaluations des prototypes obtenues peuvent permettre d'une part l'émergence de nouvelles connaissances (scientifiques ou provenant de l'expertise des conseillers techniques) . D'autre part, elles peuvent aussi conduire à la reconception avec le groupe d'experts des prototypes de systèmes de culture si les prototypes initialement évalués ne conviennent pas. La phase ultime de cette démarche étant de sélectionner des systèmes de culture innovants intéressants du point de vue de la gestion des maladies telluriques qui pourront être ensuite testés en parcelles expérimentales. L'utilisation d'un modèle permet de fusionner, de synthétiser des corps de connaissances différents en les mixant. Par ailleurs, l'expérimentation est un processus long et coûteux qui doit être utilisé avec le plus de discernement possible, justifiant ainsi l'utilisation d'un modèle permettant de filtrer les différentes alternatives de systèmes de culture innovants en amont de l'expérimentation. Ce type de

démarche est actuellement mis en place sur deux types de systèmes de production dans le cadre de la tâche (iv) du projet Sysbiotel⁵ ; les cultures légumières de plein champ de Basse Normandie (INRA de Rennes) et les cultures légumières sous abri froid en région PACA (INRA d'Avignon). Ma mission dans le cadre d'une démarche de co-conception de systèmes de culture à l'INRA d'Avignon, est donc de mettre au point un outil d'évaluation de systèmes de culture innovants vis-à-vis de la gestion des bioagresseurs telluriques. Cet outil d'évaluation multicritère créé doit permettre d'évaluer spécifiquement la capacité de systèmes de culture à gérer quatre bioagresseurs telluriques : les nématodes à galle *Meloidogyne* et trois champignons du collet (*Sclerotinia spp*, *Rhizoctonia solani* et *Botrytis cinerea*).

1.2) Thématique de travail et problématique

La nécessité de combiner des connaissances expertes et scientifiques pour concevoir des systèmes de culture innovants a orienté le choix des chercheurs vers l'utilisation d'un modèle basé sur une approche multicritère et qualitative (Navarrete *et al.*, 2010). Ce type de modèle multicritère et qualitatif est bien adapté à l'évaluation de systèmes complexes en prenant en compte leurs effets conflictuels et multidimensionnels et il permet facilement l'intégration de connaissances de sources diverses ; connaissances scientifiques et connaissances des acteurs de « terrain » (Sadok *et al.*, 2008). La première question qu'amène ce travail porte sur la manière de combiner des connaissances scientifiques et expertes au sein d'un modèle d'évaluation multicritère et qualitatif pour contribuer à la création de solutions de gestion des bioagresseurs telluriques.

Ensuite, l'outil que l'on souhaite développer étant basé sur une approche multicritère et entièrement qualitative, la question de la méthodologie de validation à mettre en œuvre pour valider le fonctionnement et les sorties qualitatives de l'outil se pose. En effet, pour ce type d'outil, il n'existe pas encore de méthodes standardisées à l'image des méthodes existantes pour valider les modèles aux sorties quantitatives. Les chercheurs produisant ce type de modèle acquièrent généralement de la confiance sur la qualité de leurs modèles en recoupant les connaissances scientifiques, les visions d'acteurs d'horizon différents, les observations obtenues en conditions réelles sur le système étudié, et en les confrontant ensuite aux sorties du modèle créé.

La problématique de ce travail peut être donc formulée de la façon suivante :

Comment valoriser des connaissances issues de la littérature scientifique, de l'expérience des acteurs du « terrain » et de données d'observations en parcelle de producteurs pour construire et valider un outil d'évaluation multicritère de système de culture ?

L'objectif sous jacent de mon travail est donc de développer une méthodologie permettant d'une part la construction d'un outil d'évaluation en intégrant dans sa structure des connaissances issues de l'expérience de conseillers techniques en complément des connaissances scientifiques, et d'autre part la validation de l'outil par confrontation de ses sorties à des connaissances proches de la réalité du « terrain ».

Les étapes de travail à envisager sont donc une première phase de construction de la structure de l'outil à partir de connaissances scientifiques présentes dans la littérature et connaissances

⁵ Sysbiotel : Projet sur la gestion intégrée des bioagresseurs telluriques en systèmes de culture légumiers, soutenu par l'ANR dans le cadre de l'appel à projet Systerra. <http://www.inra.fr/sysbiotel>

provenant de l'expérience des acteurs du « terrain ». Puis une deuxième phase qui consistera à valider le fonctionnement et les sorties du modèle créé via une méthodologie formalisée au cours de ce travail. Cette méthode s'appuiera sur l'utilisation de données d'observations issues de parcelles de producteurs et sur l'expertise de conseillers techniques en maraîchage.

Des éléments de méthodologie sur la construction et la validation d'un modèle d'évaluation multicritère et qualitatif sont donc proposés à travers ce travail. Le principal résultat attendu de ce travail réside tout de même dans la mise au point d'un modèle d'évaluation multicritère et qualitatif permettant ainsi de porter un jugement sur la qualité des systèmes de culture dans la gestion des problèmes de ravageurs et de maladies telluriques.

II) Le cas particulier étudié : le maraîchage sous abri froid en région PACA

II.1) Des systèmes de culture intensifs et spécialisés

La Provence est depuis longtemps un important bassin de production maraîchère français. Ce bassin s'étend sur les deux départements de la région PACA que sont les Bouches du Rhône et le Vaucluse.

La situation géographique de ce bassin (Figure 2 et Figure 3) est propice au développement de l'activité de maraîchage, étant en effet situé au Sud de la vallée du Rhône, celui-ci est baigné par de nombreux cours d'eau ayant charrié des limons et façonné des sols fertiles. De plus, la présence de cours d'eau a permis la mise en place de réseaux d'irrigation (ex : canal de Craonne en plaine de Crau).

D'autre part, les conditions climatiques de la région avec un ensoleillement annuel fort (2800 heures par an environ) et des températures douces en hiver et chaudes en été, sont favorables à la production sous abri de divers légumes, tout au long de l'année. La Provence était considérée à la fin du XIX^{ème} siècle comme « le jardin de l'Europe » car elle bénéficiait d'une précocité de production (production primeur), un atout majeur par rapport aux autres régions de production françaises et européennes. Les cultures maraîchères sous abri favorisant l'obtention de productions précoces se sont fortement développées dans cette région.

A partir de 1986, année de l'entrée de l'Espagne et du Portugal dans l'Union Européenne, la production maraîchère provençale fut perturbée par la concurrence de ces nouveaux pays sur le marché européen bénéficiant aussi de la précocité de la production mais à des coûts inférieurs (Chambre d'agriculture du Vaucluse, 2008). Cette concurrence émergente des pays du Sud de l'Europe puis du Maghreb ainsi que la situation géographique du bassin provençale de production maraîchère au carrefour entre Europe du Sud (Italie, Espagne...) et Europe du Nord ont entraîné l'intensification de la production maraîchère en Provence. L'intensification s'est caractérisée par la multiplication de systèmes de production sous abris (tunnels froids, serres multi chapelles...) permettant d'augmenter le nombre de cultures réalisées à l'année et de maintenir des conditions climatiques stables bénéfiques au développement des cultures.

Cette intensification est à mettre en relation avec une spécialisation de la production maraîchère induite par les exigences commerciales des filières. Classiquement en région PACA, des salades sont implantées sous tunnel à l'automne et en hiver (septembre à mars). La culture de salade est devenue la culture centrale dans les successions culturales des systèmes de culture provençaux car elle assure un revenu stable aux agriculteurs contrairement aux cultures de printemps et d'été dont les prix de vente fluctuent énormément sur les marchés. Les cultures de légumes-fruits prennent le relai à partir du printemps (mi-mars), avec des espèces appartenant principalement à

deux familles botaniques, les Solanacées (tomate, aubergine, poivron...) et les Cucurbitacées (courgette, concombre, melon...). Selon les cultures mises en place au printemps, un créneau d'interculture plus ou moins long (juillet-août) peut être utilisé pour réaliser des techniques de lutte contre les bioagresseurs.

A l'heure actuelle, un tiers des tomates de l'hexagone sont produites dans le département des Bouches-du-Rhône soit environ 230 000 tonnes. Ce département est aussi au premier rang pour la production de courgettes et de salades. Il faut savoir qu'un tiers des surfaces légumières des Bouches du Rhône sont cultivées sous serres ou abris hauts (Agreste PACA, 2008).

Le Vaucluse représente 14 % de la production nationale de melons et s'affiche au 2^e rang après le département de l'Hérault. Ce département se situe au deuxième rang national pour la production de courgettes, poivrons et aubergines (Agreste PACA, 2009). Il faut préciser que pour les cultures de tomates et de concombres, les importants tonnages en légumes obtenus chaque année pour le département des Bouches du Rhône proviennent majoritairement d'abris hauts chauffés généralement hors sol qui peuvent permettre une production continue sur une durée de 11 mois ou plus.

La Provence est donc une importante zone de production de cultures maraichères dont une part importante est produite sous abri. Les agriculteurs provençaux au fil du temps ont intensifié et spécialisé leur système de culture sur quelques légumes pour répondre aux exigences de la distribution et pour rester les plus compétitifs possible face à une forte concurrence sur le marché français et européen.

II.2) Le développement des ravageurs et maladies telluriques dans les abris provençaux

La faible diversité des espèces dans les successions, le retour chaque année des mêmes cultures dans les tunnels, l'absence de pratiques de prophylaxie (par exemple le nettoyage des outils de travail du sol, la sortie des résidus de culture...) ont conduit au cours du temps à une augmentation de la pression parasitaire dans les abris. Certaines maladies et ravageurs telluriques sont devenus un problème majeur pour les producteurs car à l'origine d'importants dégâts sur les cultures et par conséquent de pertes économiques considérables. Les principaux bioagresseurs posant problèmes sont les nématodes à galles *Meloidogyne* sp., les champignons du collet (*Sclerotinia*, *Rhizoctonia solani*, *Botrytis cinerea*), les bactéries comme *Pseudomonas* et les maladies vasculaires comme *Fusarium* (Dijan Caporalino, 2010 ; témoignage de conseillers techniques). Les bioagresseurs telluriques brièvement présentés ci-dessous correspondent aux quatre bioagresseurs dont la gestion dans les abris froids sera l'objet d'étude de l'outil d'évaluation multicritère mis au point au cours de ce travail.

II.2.1) Les nématodes à galle *Meloidogyne* sp.

Description morphologique

Les nématodes à galle du genre *Meloidogyne* comptent de nombreuses espèces, parmi les plus fréquentes, on distingue des espèces dont l'origine géographique est plutôt semi-tropicale (*M. arenaria*, *M. javanica*...) et des espèces plus nordiques comme *M. hapla*, la répartition géographique de *M. incognita* étant intermédiaire (Blancard *et al*, 2003).

Ce sont de petits vers ronds sans têtes bien définies, à symétrie bilatérale et à la taille microscopique (de 200 µm à 1-3 mm de long pour un diamètre compris entre 10 et 40 µm). L'une

des particularités anatomiques des ces nématodes phytoparasites est qu'ils sont dotés d'un appendice buccal en forme de stylet.

Biologie et cycle de développement

Les nématodes à galle sont des endoparasites sédentaires (Regnault-Roger *et al*, 2002) c'est-à-dire qu'ils effectuent une partie de leur cycle de développement à l'intérieur de la plante. Le cycle de développement des ravageurs peut durer de trois à huit semaines selon les conditions externes de températures (De Guiran, 1983, Bertrand, 2001). Il peut donc y avoir plusieurs cycles au cours d'une année. Le cycle du ravageur se décompose en six stades ; un stade œuf, quatre stades juvéniles et un stade adulte (Figure 4). En fait, les nématodes *Meloidogyne sp.* sont présents dans le sol sous forme de masses d'œufs protégées de gangues mucilagineuses (De Guiran, 1983). Lorsque l'œuf éclos, les larves au stade juvénile 1 restent dans l'enveloppe de l'œuf. Le stade juvénile 2 correspond à la forme de dissémination des ravageurs, des larves filiformes et longues de 0.5 mm environ quittent l'enveloppe de l'œuf et se déplacent de quelques centimètres dans le sol grâce à l'eau d'irrigation ou de ruissellement. Ce déplacement se fait sous l'influence de gradients d'exudats racinaires et de CO₂. Les nématodes peuvent être aussi disséminés dans des parcelles non contaminées par des poussières provenant d'un sol contaminé, transportées par le vent ou le matériel agricole, ou encore par des débris de racines (Villeneuve, 1999).

Les larves au stade juvénile 2 vont alors pénétrer dans les racines d'une plante hôte et évoluer en juvénile 3 puis juvénile 4 tout en migrant à travers les cellules parenchymateuses pour atteindre le système vasculaire de la plante où elles puiseront leur nourriture. Les piqûres dans les cellules successivement traversées par les larves déversent des enzymes et hormones entraînant le grossissement des cellules et la formation de cellules géantes. Les larves installées dans les racines ayant gonflées vont continuer leur évolution larvaire en se dissociant en mâle ou en femelle après plusieurs mues. Les mâles filiformes sont alors éjectés de la racine et n'ont pas d'incidence pathogène. En revanche, les femelles piriformes volumineuses installées dans une galle racinaire vont produire 400 à 500 œufs déversés en dehors de la racine et entourés de leur gangue mucilagineuse. Les œufs une fois dans le sol constituent un inoculum résistant au froid, à la sécheresse et capable de se conserver jusqu'à une durée de 8 ans dans le sol (Rittler, 1971).

Les facteurs de développement des ravageurs

La durée du cycle de développement des nématodes est fortement dépendante des conditions de température (le cycle peut être de trois semaines à 28°C (De Guiran, 1983) et de six semaines à 25°C (Bertrand et Lizot, 2001)). Lorsque les températures sont basses, dans le cas de cultures d'hiver comme les salades sous abri, l'infestation se fait lentement. La température optimale de développement de *Meloidogyne* serait de 28°C, son développement serait limité en dessous de 16°C et à partir de 40°C (Cayrol, 1971). Le type de sol influe aussi sur le développement du nématode. Les attaques de *Meloidogyne* sont plus fortes sur sols légers, où le déplacement des larves est plus facile, que sur sols riches en argile. De plus, les sols à forte teneur en matière organique sont plutôt défavorables au développement des *Meloidogyne*. Le développement du ravageur dépend aussi de facteurs externes comme l'âge de la plante, son approvisionnement en éléments minéraux. Une plante hôte carencée peut favoriser le développement du nématode alors qu'une plante bien alimentée en azote au cours de la culture présentera une certaine vigueur qui lui permettra de mieux supporter les attaques de nématodes (De Guiran, 1971).

Les cultures hôtes, les symptômes et les dégâts causés

Les nématodes à galles *Meloidogyne* sont très polyphages et s'attaquent à plus de 5000 espèces de plantes ; les cucurbitacées (melon, concombre), les solanacées (tomate, aubergine) et les astéracées (laitue) comptent parmi les plus sensibles (Djian-Caporalino *et al*, 2009). En France, les cultures maraichères sous abri sont les plus touchées par ce ravageur, il s'attaque à la plupart des légumes cultivés.

Les symptômes observés sur les racines des plantes atteintes sont des galles plus ou moins grosses en fonction de l'espèce et du taux d'inoculum présent dans le sol. Les galles grossissent, peuvent fusionner faisant ainsi disparaître le chevelu racinaire. La présence de galle induit un dysfonctionnement racinaire qui peut conduire à un dépérissement rapide de la plante (Regnault-Roger *et al*, 2002). Les symptômes sur la partie aérienne de la plante ne sont pas spécifiques et traduisent d'un affaiblissement du système racinaire (jaunissement des feuilles, flétrissement plus rapide en cas de sécheresse...). Il est donc assez compliqué de chiffrer les dégâts dus aux nématodes. On considère que les dommages qu'ils induisent directement représentent 10% des pertes de rendement dans le monde en cultures légumières (Regnault-Roger *et al*, 2002).

Les nématodes à galle représentent un problème important pour un producteur lorsqu'ils sont présents dans une parcelle, en effet ces ravageurs sont assez difficiles à éradiquer du fait de la présence d'une forme de conservation (œufs) dans leur cycle. De plus, ils ont un cycle de développement qui peut être assez rapide lorsque les conditions de température sont adaptées (période estivale). Plusieurs cycles peuvent se succéder en une année et l'infestation peut atteindre 100 à 200 larves par litre de sol, sur des profondeurs parfois supérieures à 30 cm (De Guiran, 1971, 1983).

II.2.2) Les champignons du collet : *Sclerotinia* sp., *Rhizoctonia solani* et *Botrytis cinerea*

- *Sclerotinia* sp. (Figure 5)

En cultures maraichères, les deux espèces prédominantes sont *Sclerotinia minor* et *Sclerotinia sclerotinium*. Ces deux souches de la famille des ascomycètes sont très polyphages ; 408 espèces de plantes sont répertoriées sensibles pour *S. Sclerotinium* et 94 espèces pour *S. minor* (Boland et Hall, 1994 ; Melzer et al, 1997). Ces pathogènes infestent de nombreuses cultures légumières y compris les astéracées (laitues), les cucurbitacées (melons)...L'espèce de *Sclerotinia* prédominante varie selon les localisations géographiques, il semblerait qu'en Provence *S. sclerotinium* soit l'espèce la plus présente.

Ces champignons peuvent se maintenir longtemps dans les sols (jusqu'à 10 ans) sous forme de sclérotés ou de mycélium. Les sclérotés germent ensuite pour produire du mycélium qui envahit le collet et les feuilles basses des plantes. La contamination peut aussi être aérienne pour *S. sclerotiorum* puisque dans certains cas, le champignon peut former des apothécies qui permettent ensuite de créer des ascospores disséminées par le vent ou par les outils et qui germeront à leur tour si l'humidité est suffisante (Blancard *et al.*, 2003). Les conditions optimales pour la germination des sclérotés sont des conditions humides et une température comprise entre 15 et 21 °C.

La pénétration du champignon dans la plante se fait par les tissus sénescents ou morts et celui-ci se dissémine ensuite largement dans la plante en produisant des enzymes lytiques entraînant le pourrissement des tissus.

Les sclérotés sont produits à partir du mycélium présent sur la plante, elles correspondent à la forme de conservation du champignon (voir cycle de développement)

Les premiers symptômes sont des altérations humides de couleur brun clair sur les zones en contact avec le sol puis les altérations se généralisent aux zones proches. Le pathogène à terme entraîne un flétrissement de la plante et une pourriture généralisée. L'observation visuelle des parties aériennes de la plante permet rapidement de conclure à une infestation par *Sclerotinia spp* ; la présence d'un mycélium blanc cotonneux sur lequel on retrouve des sclérotés de couleur noire, plutôt gros (2 à 20 mm de long) et allongés pour *S.sclerotiorum* et plus petits (0.5 à 2 mm) et irréguliers pour *S. minor* sont en effet très significatifs (Blancard *et al.*, 2003 ; Laemmlen, 2001; Pernezny et Purdy, 2009).

- **Rhizoctonia solani**

Ce champignon comme *Sclerotinia* entraîne la fonte du collet des plantes. Il appartient à la famille des basidiomycètes et il est lui aussi capable de survivre de nombreuses années sous forme de mycélium ou de sclérotés en colonisant la matière organique, ou sur différentes plantes hôtes puisqu'il est assez polyphage (Ceresini, 1999).

La particularité de ce champignon est qu'il ne produit aucune conidie (ou spore asexuée). Il est présent sous forme de mycélium et sclérote (Ceresini, 1999). Les formes de conservation de *R. solani* sont le mycélium ou le pseudo-sclérote, présent sur la matière organique ou les débris végétaux présents à la surface du sol. Le mycélium, présent dans le sol ou issu de sclérotés colonise ensuite les feuilles au contact du sol en pénétrant par les stomates ou par les blessures présentes (Blancard *et al.*, 2003). La production d'enzymes extracellulaires permet de dégrader les cellules de la plante (en détruisant à la fois la cellulose, chitine ou pectine), ce qui provoque la pourriture des tissus (Ceresini, 1999). A partir des tissus abimés, le mycélium colonise les autres parties de la plante ou les plantes voisines, et les sclérotés présents au sol ou les spores formées sur les basides permettent elles aussi la dissémination du pathogène, par le vent ou le matériel souillé (Blancard *et al.*, 2003) *R.solani* est capable d'infecter un grand nombre d'hôtes différents, et les attaques se font en premier lieu sur les parties enterrées des plantes telles que les graines ou racines, mais les parties aériennes peuvent être également touchées. Les principaux symptômes sont la fonte des semis, c'est-à-dire le manque à la levée de certaines graines, et le pourrissement basal des cultures (Ceresini, 1999). Les salades sont les principales cultures affectées, notamment sous abri à l'approche de la récolte où les infections obligent parfois à parer de façon importante les salades afin d'éliminer les feuilles abimées au contact du sol (Blancard *et al.*, 2003).

- **Botrytis cinerea (Figure 6)**

Ce champignon est saprophyte et très polyphage. Il est capable de se conserver sur plusieurs centaines de plantes ou adventices vivantes. Ce champignon se développe en condition humide et à un optimum de température compris entre 10 et 20°C. Ce pathogène se conserve sous forme de conidies, mycélium ou sclérotés (Pappas, 2000 ; Blancard *et al.*, 2003 ; Garibaldi *et al.*, 1997).

Lorsque les conditions de développement deviennent propices, les conidies produites à partir de mycélium restants, ou à partir des sclérotés, servent d'inoculum primaire et germent pour coloniser les organes avec lequel il est en contact (Pappas, 2000).

Le tube germinatif des conidies ou le mycélium des sclérotés pénètre donc la cuticule des plantes ou les tissus nécrosés ou altérés par d'autres pathogènes tels que *Sclerotinia minor* ou *Rhizoctonia solani*, et se dissémine vers tous les autres organes (Blancard *et al.*, 2003), soit par contact direct, soit grâce aux courants d'airs ou éclaboussures lors d'arrosage (Garibaldi *et al.*, 1997 ; Blancard *et al.*, 2003). Sur les organes infestés, la production de conidiophores et de mycélium permet de créer des conidies continuellement et permet la dissémination de *B. cinerea* (Blancard *et al.*, 2003).

La plupart des cultures maraîchères peuvent être affectées par ce pathogène (tomates, salades, aubergine, poivrons, fraises) et toutes les parties aériennes peuvent être touchées (Elad *et al.*, 1996). Les zones atteintes sont d'abord envahies d'une pourriture humide marron/brune puis se couvrent de fructifications grises typiques sur lesquelles des sclérotés noirs sont parfois observables (Fig. (Blancard *et al.*, 2003 ; Pappas, 2000). L'infection par *B. cinerea* cause des pertes de rendements pouvant aller jusqu'à 50% mais les fruits peuvent aussi être directement atteints, comme c'est le cas sur la tomate, où des symptômes nommés « Ghost spots » altèrent la qualité du fruit (Pappas, 2000).

II.3) Vers des pratiques alternatives de gestion des bio agresseurs telluriques

Les moyens de désinfection chimique des sols disparaissant peu à peu, un certain nombre de techniques alternatives aux produits phytosanitaires pour gérer les populations de nématodes à galle et de pathogènes telluriques dans les abris ont été développées ou sont en cours de développement. Certaines techniques étaient utilisées autrefois en cultures maraîchères et avaient été abandonnées lors du développement de l'utilisation du bromure méthyle pour désinfecter les sols. Par exemple, l'implantation d'engrais vert assainissant dans les tunnels en période d'interculture est une pratique culturale connue depuis longtemps, que les producteurs se réapproprient depuis quelques années. D'autres techniques sont plus récentes et se sont développées ces dernières années comme la solarisation par exemple.

II.3.1) Les techniques de désinfection thermique

Tout d'abord, il existe les techniques thermiques qui ont pour principe d'action commun la montée en température des premiers horizons du sol à des températures létales pour la plupart des microorganismes du sol. La désinfection vapeur est une de ces techniques ; Cette technique consiste à pulvériser à l'aide d'une machine de la vapeur d'eau à la surface du sol. Celle-ci est assez coûteuse en temps et en argent (prix du matériel élevé et énergie), elle est par conséquent très peu répandue chez les agriculteurs.

La solarisation est une technique plus récente de désinfection thermique. Elle consiste à élever la température du sol pendant une durée assez longue (supérieure à 45 jours) pour détruire certains microorganismes pathogènes présents dans le sol ainsi que les graines de plantes adventices.

Pour cette technique, une bâche de polyéthylène fine (entre 25 et 30 micromètres) et transparente, est disposée sur le sol dans les tunnels. Cette bâche permet de capturer l'énergie solaire et de transmettre au sol des infrarouges de plus grandes longueurs d'onde capables de créer un effet de serre. Le sol doit être au préalable préparé sur 25-30 cm avec une structure fine

et irriguée jusqu'à la capacité au champ, ce qui permet de transmettre l'énergie vers les couches de sols plus profondes. Les résultats obtenus par l'utilisation de cette technique sont directement liés au climat, cette technique n'est donc applicable qu'aux régions méditerranéennes ou tropicales qui bénéficient d'un fort ensoleillement (GRAB et APREL, 2011).

Cette technique engendre un vide biologique partiel par la destruction de la faune mésophile. Cependant, les antagonistes survivent mieux que les bioagresseurs et recolonisent plus vite le sol grâce à leur plus grande résistance à la chaleur et à leurs importantes capacités saprophytiques (Bonanomi *et al*, 2008). En effet, après solarisation, de forts taux de *Bacillus* spp, de *Pseudomonas* spp ou *Trichoderma* spp, antagonistes de *Sclerotinia* et *Meloidogyne*, ont été observés (Philips, 1990).

II.3.2) L'utilisation d'engrais vert assainissant

Cette pratique consiste à utiliser des cultures non commerciales non hôtes des *Meloidogyne* ou des champignons du collet qui créent une rupture dans le cycle de développement des ravageurs et pathogènes phytoparasites dont une partie importante se fait en présence de la plante.

Le sorgho est le principal engrais vert utilisé par les maraîchers provençaux à l'heure actuelle, cette espèce semble avoir des effets prometteurs sur les nématodes, par ses propriétés de plantes non hôtes et ses apports importants de biomasse. Mais le sorgho fourrager (*Sorghum sudanense* cv. Piper) utilisé à l'heure actuelle n'a pas de propriétés biocides, alors qu'il semblerait qu'il existe des variétés possédant des propriétés biocides par libération de cyanure d'hydrogène toxique pour les bioagresseurs telluriques (Viaene & Abawi, 1998 ; Abawi & Widmer, 2000).

Il existe aussi des espèces d'engrais vert comme les alliées et les brassicées ayant des propriétés biocides permettant d'éliminer les champignons *Sclerotinia* et les nématodes *Meloidogyne*. Les alliées (ex : oignon, ail) dégagent dans le sol des composés soufrés comme les diméthyle-sulfures et les thiosulfates qui auraient des effets biocides. Les brassicées sont des espèces végétales qui contiennent des glucosinolates (GSL) qui sous l'action d'une enzyme, la myrosinase, se décomposent en isothiocyanates (ITC) et thiocyanates, qui sont des composés biocides pour de nombreux organismes. De nombreuses espèces de cette famille peuvent être utilisées contre les nématodes et les champignons du sol, notamment les moutardes (*Sinapsis alba* – moutarde blanche, *Brassica juncea* – moutarde brune) ou les radis (*Raphanus sativus*) (Djian-Caporalino *et al.*, 2009).

L'implantation de telles cultures aux propriétés biocides pour les enfouir dans le sol correspond à une technique récente appelée la biofumigation. Cette technique est en cours de développement, elle n'est pour l'instant pas pratiquée par les maraîchers provençaux (source : conseillers techniques). On peut parler aussi de biodésinfection pour cette technique dans le cas où un bâchage après enfouissement des plantes aux propriétés biocides est réalisé. Ce bâchage du sol de 4 à 6 semaines permet de créer un confinement et de maintenir dans le sol les substances toxiques pour les bioagresseurs dans le sol.

II.3.3) Autres techniques alternatives de gestion des bioagresseurs telluriques

D'autres techniques peuvent être mobilisées comme l'utilisation d'amendements organiques tels que le tourteau de neem et de ricin pour leurs propriétés nématicides. L'apport de tourteau de type mélange neem-ricin à 5t/ha permet une action létale efficace sur les populations de nématodes à galle.

Une autre technique un peu plus marginale est l'utilisation du contrôle biologique en inoculant dans le sol des microorganismes antagonistes des champignons pathogènes (ex : *Trichoderma hazardium* pour lutter contre *Sclerotinia*) (Litterick *et al.*, 2004).

Enfin, des techniques consistant à utiliser des cultures hôtes de nématodes *Meloidogyne* capables de piéger les ravageurs et de les tuer sont en cours d'expérimentation. Pour cette technique des variétés d'une espèce normalement sensible aux nématodes (poivron/piment) vont attirer les nématodes des couches profondes grâce à leurs exsudats racinaires puis les bloquer à l'intérieur de la racine par une réaction d'hypersensibilité (mort rapide et localisée des cellules végétales autour du nématode due à l'expression d'un gène de résistance). Cette réaction peut être précoce (elle empêche la migration des larves jusqu'au cylindre central, qui sont ainsi privées de nourriture) ou tardive (le développement du site nourricier des nématodes est bloqué) (Dijan-Caporalino *et al.*, 2009). Ces cultures pièges des nématodes présentent des perspectives intéressantes, on peut imaginer qu'elles soient utilisées dans les systèmes de culture en étant mise en place de la même façon qu'un engrais vert.

II.3.4) Les pratiques de prophylaxie

Les pratiques prophylactiques permettent d'une part de prévenir les sources potentielles de contamination d'une parcelle saine, et de limiter la dissémination des bioagresseurs dans les parcelles atteintes. La dissémination des œufs ou juvéniles pour *Meloidogyne* et des sclérototes pour *Sclerotinia* se fait passivement par l'eau (irrigation, drainage...), par le transport de terre (par le matériel agricole, par les chaussures...) ou de parties de végétaux (résidus de plants contaminés, débris de racines). Il est donc conseillé aux producteurs de nettoyer les outils de travail du sol entre le travail de deux parcelles différentes. Il leur est aussi recommandé de définir un ordre de travail pour le travail du sol des parcelles, c'est-à-dire de commencer par travailler les parcelles considérées comme les plus saines avant les parcelles dans lesquelles les bioagresseurs telluriques sont présents. Le contrôle de la qualité sanitaire des plants avant l'implantation est aussi une pratique importante car elle permet d'éviter l'introduction d'un inoculum dans des parcelles saines. La gestion du matériel végétal infesté en cours de culture est aussi important, le fait de sortir et brûler les plants infestés par des pathogènes telluriques diminue le risque de dissémination dans le tunnel. De plus, l'arrachage des plants avec leurs racines et la sortie des déchets végétaux des tunnels permettent aussi d'éviter la dissémination supplémentaire des œufs et sclérototes dans les tunnels. Enfin, la bonne gestion des adventices à l'intérieur et aux abords des abris limite aussi le risque de dissémination car les adventices peuvent être elles aussi hôtes des différents bioagresseurs et favoriser leur prolifération dans les abris.

II.3.5) L'apport de matière organique pour favoriser l'activité biologique du sol

Certaines pratiques culturales peuvent entraîner la modification des équilibres biologiques du sol, les populations de microorganismes antagonistes peuvent être favorisées et ainsi jouer un rôle de prédation ou de compétition trophique vis-à-vis des ravageurs et pathogènes telluriques. Les apports de matière organique dans les sols par des amendements comme des résidus de culture compostés ou non, des fumiers, lisiers, des composts végétaux... ou encore les apports de matière végétale fraîche par l'enfouissement d'un engrais vert sont favorables d'une part à la structure du sol (aération, capacité de rétention d'eau...) mais il semblerait qu'ils permettent aussi un contrôle des populations de nématodes *Meloidogyne*, de *Rhizoctonia solani*, de *Sclerotinia minor*... en favorisant les interactions entre microorganismes antagonistes (Bonanomi *et al.*, 2007 ; Litterick *et al.*, 2004).

Il existe donc plusieurs techniques alternatives de contrôle des bioagresseurs mais certaines expérimentations ont montré les limites d'efficacité de ces techniques lorsqu'elles sont utilisées individuellement. Il est donc nécessaire de réfléchir aujourd'hui à l'intégration de combinaisons de techniques dans les systèmes de culture maraichers sous abri, ces combinaisons de techniques permettraient certainement de gagner en efficacité au niveau de la gestion des bioagresseurs.

Partie 2 : Matériel et Méthodes

I) Utilisation du logiciel DEXi pour construire un outil d'évaluation multicritère.

I.1) Présentation du logiciel DEXi

Pour construire l'outil d'évaluation, nous avons utilisé le logiciel DEXi (Bohanec, 2008) ; Ce logiciel est basé sur une méthode d'évaluation multicritère appelée la méthode DEX (Bohanec *et al.*, 1990), qui permet l'implémentation d'un arbre d'évaluation multicritère et qualitatif. Ce logiciel permet donc la gestion de données qualitatives et la création d'un arbre permettant l'évaluation à partir de ces données qualitatives. L'outil construit à partir de ce logiciel est basé sur l'analyse multicritère. L'analyse multicritère (MCA-Multi Criteria Analysis) est considérée comme un outil de prise de décision permettant de trouver une solution en évaluant plusieurs alternatives ou attentes différentes lors d'un problème complexe (Munda, 2003 ; Department for Communities and Local Government, 2009). Cette approche d'analyse multicritère consiste en l'agrégation de différents critères afin de sélectionner une ou plusieurs solutions, options ou alternatives représentant le meilleur compromis possible (Ben Mena, 2000). Ce logiciel permet dans le cadre de notre travail de construire un modèle réalisant l'évaluation de la capacité de gestion des plusieurs bioagresseurs telluriques par un système de culture, ceci constitue donc un problème complexe caractérisé par un grand nombre de critères.

1.2) Principe de l'arbre d'évaluation dans DEXi

L'arbre construit est composé de deux types d'attributs, les attributs de base ou « feuilles » qui correspondent aux entrées du modèle et les attributs agrégés ou « nœuds », qui sont obtenus par agrégation de plusieurs attributs situés à un niveau inférieur dans la hiérarchie de l'arbre. Chaque attribut de l'arbre ne peut prendre que des valeurs discrètes et qualitatives, réunies en une « échelle ». Cette échelle est composée généralement de deux à quatre valeurs, par exemple l'attribut X peut prendre une valeur de l'échelle suivante « Elevé », « Moyen », « Faible ».

Les valeurs prises par les attributs sont calculées par DEXi à partir de « fonctions d'utilités ». Pour chaque critère Y issu de l'agrégation de $X_1, X_2 \dots X_n$, une fonction d'utilité est définie. Celle-ci détermine quelle valeur prend l'attribut Y en fonction des valeurs des attributs X_i qui lui sont reliés. (Figure 8). Cela se traduit par des règles du type si-alors :

SI $X_1 =$ « Moyen » et $X_2 =$ « Elevé » ALORS $Y =$ « Elevé »

Ainsi chaque valeur prise par un critère agrégé est définie par une règle d'agrégation.

Les fonctions d'utilité se renseignent au moyen de tables de contingence (Figure 7), dans lesquelles chaque ligne correspond à une règle d'agrégation. Ces tables peuvent être remplies de deux manières différentes :

- soit les résultats de toutes les combinaisons de l'agrégation sont indiqués par le concepteur, et le logiciel calcule ensuite le poids de chaque critère dans l'agrégation
- soit on définit au préalable le poids que l'on souhaite donner à chaque critère et le logiciel remplit ensuite lui-même de façon mécanique, la table.

Généralement, ces deux démarches sont utilisées de manière complémentaire pour remplir les tables de contingence.

Les critères de l'arbre s'agrègent donc à partir des attributs d'entrée vers le critère final d'évaluation ou l'attribut racine qui donne la valeur finale de l'évaluation.

DEXi facilite donc la construction d'un arbre d'évaluation combinant de nombreux critères qualitatifs qui en s'agrégeant au sein d'une structure hiérarchique permettent l'évaluation d'un système complexe. Ces systèmes peuvent être ensuite comparés en fonction de la note ou valeur donnée au critère d'évaluation final. La construction de l'évaluation finale est totalement transparente puisqu'il est possible de redescendre dans la structure hiérarchique et d'identifier les attributs de l'arbre qui influencent l'évaluation finale.

Les sorties de DEXi peuvent être observées sous forme de graphiques (histogramme et radar) qui permettent notamment de comparer différentes alternatives paramétrées dans l'outil.

1.3) Le fonctionnement de l'arbre d'évaluation (Figure 9).

Une fois construit dans logiciel, l'arbre d'évaluation peut permettre d'évaluer différents systèmes de culture. Dans notre cas, des systèmes de culture maraîchers sous tunnel sont évalués sur leur capacité à résister et à gérer les pressions en bioagresseurs telluriques, ce qui a été appelé « qualité sanitaire ». Cette « qualité sanitaire » constitue le critère d'évaluation finale, sur lequel sont comparées différentes options ou alternatives de systèmes de culture. Le fonctionnement de l'arbre d'évaluation est assez simple, les systèmes de culture que l'on cherche à évaluer sont paramétrés par les attributs d'entrée dans le modèle qui correspondent à la description de ces systèmes (caractérisation des pratiques culturales, des caractéristiques physiques de l'abri...). Ces

attributs d'entrée vont s'agréger pour donner des attributs agrégés qui eux même vont s'agréger pour donner au final la valeur du critère final correspondant à l'évaluation finale.

II) Les étapes de construction de l'arbre d'évaluation multicritère

II.1) Un premier arbre d'évaluation basé sur la littérature scientifique

II.1.1) Une première structure d'arbre d'évaluation

La première étape de la phase de construction a consisté à mettre au point un arbre d'évaluation théorique uniquement construit à partir de connaissances collectées dans la littérature scientifique (cf Annexe 1). Cette étape de la construction avait été réalisée lors de mon arrivée en stage, une première structure d'arbre d'évaluation était donc disponible.

La construction de cette structure hiérarchique s'est faite en mobilisant deux approches de conception de la vision multicritère d'un système.

La première est l'approche « top down » ou « descendante » consistant à construire une structure hiérarchique en partant d'une entité englobante qui se divise en sous entités qui à leur tour se décomposent jusqu'à ce qu'un niveau que l'on peut qualifier de critères d'évaluation du système soit atteint (Keeney, 1992).

Dans le cas présent, l'entité englobante a été appelée « qualité sanitaire », elle correspond à la capacité d'un système de culture à résister et à gérer à long terme des infestations en bioagresseurs telluriques. Les sous entités correspondent à des voies de gestion des bioagresseurs permettant d'atteindre la « qualité sanitaire ». L'identification de ces sous entités s'est faite à partir d'un cycle de développement théorique et imaginé, commun aux quatre bioagresseurs (Figure 10).

Les connaissances issues de la littérature scientifique sur les différents cycles de développement des quatre bioagresseurs telluriques (*Meloidogyne*, *Sclerotinia* spp, *Rhizctonia solani* et *Botrytis cinerea*) ont permis de mettre en évidence des traits communs aux différents cycles de développement et ainsi la définition d'un seul cycle basé sur ces traits communs entre les cycles. Pour chacun de ces cycles, une part importante du cycle est réalisée en présence de la plante, au sein de laquelle les bioagresseurs se développent et se multiplient (développement mycélien, passage aux stades supérieurs pour les nématodes...). Ensuite, l'ensemble des bioagresseurs concernés disposent dans leurs cycles de formes biologiques de conservation et de dissémination qui leur permettent de maintenir un inoculum dans le sol, pour les nématodes ce sont des œufs alors que pour les champignons, la conservation se fait grâce aux sclérotés ou au mycélium. Ces formes de conservation germent ou éclosent lorsque des conditions adéquates de température et d'humidité dans le sol sont réunies.

Trois sous entités correspondant à des voies principales de gestion ont donc été identifiées à partir de la réflexion portée sur ce cycle imaginaire. Ces trois voies principales de gestion sont les trois branches qui structurent l'arbre d'évaluation.

La première branche correspond à la gestion des bioagresseurs telluriques proprement dite. Cette gestion se fait par action sur l'inoculum présent dans le sol afin de le diminuer, celle-ci peut être directe, c'est-à-dire qu'une action létale est appliquée à l'inoculum ou indirecte dans le cas où un

ensemble de mesures prophylactiques sont mise en œuvre pour gérer les bioagresseurs. La gestion des bioagresseurs telluriques peut être réalisée par des perturbations des cycles de développement des bioagresseurs, comme la création d'une rupture de cycle.

La deuxième branche principale de l'arbre correspond à la gestion de l'environnement des bioagresseurs. Cette voie de gestion consiste à gérer l'environnement de l'abri en évitant de créer des conditions favorables au développement des ravageurs et maladies telluriques ou en créant des conditions défavorables à leur développement.

La troisième branche concerne la gestion de la sensibilité de la plante afin que celle-ci soit la plus résistante possible aux agressions extérieures et notamment à celles des pathogènes telluriques. Ainsi on considère qu'une plante vigoureuse, bien alimentée et développée est moins sensible aux attaques des bioagresseurs qu'une plante affaiblie.

La deuxième approche mobilisée dans la conception de la vision multicritère a été l'approche dite « bottom up » ou ascendante qui permet d'identifier et caractériser les conséquences de la mise en œuvre du système. Cette approche a permis de caractériser les différents critères à prendre en compte dans chacune des trois branches principales en partant de la description du système de culture.

L'approche « top down » a donc facilité la construction du haut de la structure hiérarchique de l'arbre alors que l'approche « bottom up » a plutôt favorisé le développement du bas de la structure de l'arbre comportant les attributs d'entrée.

II.1.2) Définition des règles d'agrégation et des pondérations des attributs de l'arbre théorique

Une structure d'arbre d'évaluation était disponible dès le début de mon travail, pour chacun des attributs de l'arbre, des échelles de valeurs avaient été définies en se basant sur les connaissances scientifiques. En revanche, les attributs de l'arbre n'étaient pas agrégés entre eux, celui-ci n'était donc pas encore fonctionnel.

Afin de rendre cet arbre fonctionnel, les fonctions d'utilité de chaque attribut agrégé ont été définies en complétant leurs tables de contingence respectives. Deux méthodes différentes ont été mobilisées pour remplir ces tables. La première méthode a consisté à définir un poids pour chacun des attributs s'agréant, dans ce cas le logiciel complète automatiquement l'ensemble des résultats des règles d'agrégation de la table de contingence en fonction des poids attribués. Cette manière de procéder concerne les cas d'agrégation de sous attributs pour lesquels à partir des connaissances scientifiques disponibles, il était possible de déterminer l'importance de leur appréciation dans l'appréciation de l'attribut supérieur. Par exemple, l'attribut « Sol_Etat hydrique » décrivant l'état hydrique du sol avant la solarisation et l'attribut « Sol_Travail du sol » décrivant la qualité du travail du sol avant solarisation, ont été considérés comme ayant la même importance dans l'agrégation de l'attribut supérieur décrivant la préparation du sol avant solarisation.

Cette méthode a été utilisée également pour donner des poids équivalents à chacun des attributs dans des cas où il n'était difficile de discerner l'importance d'un attribut par rapport à un autre dans l'agrégation de l'attribut supérieur.

La deuxième méthode utilisée a consisté à indiquer dans la table contingence des attributs des résultats de certaines règles d'agrégation et le logiciel a ensuite calculé les poids des attributs dans l'agrégation. Cette méthode permet de paramétrer l'agrégation des attributs de manière plus

sensible puisque chaque règle d'agrégation peut être définie au cas par cas. Nous avons procédé ainsi dans le cas où nous disposions d'informations précises sur les attributs.

I.1.3) Choix de développer un arbre théorique dans un premier temps

Le choix de développer une première structure d'arbre seulement à partir de connaissances scientifiques pour dans un deuxième temps compléter ces connaissances par des connaissances expertes se justifie par le fait que les connaissances scientifiques sont généralement présentées de manière plus détaillée et globale que les connaissances expertes. Celles-ci sont donc moins dépendantes du contexte et ainsi plus favorables à la création d'une première structure d'arbre assez généraliste. L'objectif était de développer une structure d'arbre assez large regroupant le plus d'informations possibles qui pourrait par la suite être ajustée à un contexte précis grâce à l'apport de l'expertise.

II.2) La confrontation de l'arbre d'évaluation avec les experts

I.2.1) La démarche de confrontation de l'arbre d'évaluation à l'avis d'experts

Un certain nombre de connaissances issues de la littérature scientifique, sur les techniques alternatives aux traitements chimiques ou sur les effets de ces techniques sur les bioagresseurs sont encore lacunaires dans la littérature scientifique (Collange, 2011). Les connaissances scientifiques n'étant pas suffisantes, nous avons fait appel à l'expertise de conseillers techniques spécialisés en maraîchage sous abri afin d'intégrer leur connaissances issues de l'expérience du « terrain » sur les systèmes de culture maraichers provençaux et les moyens de gestion des bioagresseurs mis en œuvre par les agriculteurs.

Cette étape faisant partie de la phase de construction de l'outil, a consisté à confronter l'arbre d'évaluation théorique à l'avis de différents conseillers techniques. Cette confrontation a pour but d'une part de mettre en évidence les incohérences dans la structure de l'outil grâce à l'expertise des conseillers détenant des connaissances concrètes sur les systèmes de culture et d'autre part d'enrichir la structure de l'arbre avec des connaissances issues en partie de l'expérience du « terrain ». Dans cette démarche, les conseillers sont considérés comme des experts et leurs connaissances informelles issues de l'observation des systèmes de culture chez les agriculteurs peuvent permettre de rendre le modèle le plus cohérent possible par rapport à la réalité. Ces connaissances étant issues d'observations de terrain présentent le risque d'être moins génériques que les connaissances scientifiques déjà utilisées, mais sont aussi plus adaptées à l'utilisation de cet arbre dans les conditions locales de la région PACA.

II.2.2) Le choix des experts

Les experts sollicités sont des conseillers techniques spécialisés en maraîchage, qui travaillent au sein d'organisations professionnelles agricoles locales situées sur un même territoire. (cf Tableau 1). Ces conseillers techniques sont tous engagés dans la démarche de co-conception de systèmes

de culture innovants en maraichage sous abri, démarche participative conduite par l'unité d'Ecodéveloppement de l'INRA d'Avignon.

Ces experts ont tout d'abord été choisis pour leur participation à cette démarche, ce qui garantit leur intérêt pour l'utilisation d'un outil d'évaluation. En effet, ils avaient chacun déjà participé à plusieurs réunions de conception de systèmes de culture innovants du point de vue de la gestion de *Meloidogyne* faisant intervenir un outil d'évaluation du même type que celui mis en place dans ce travail. Cette implication des conseillers techniques engagés dans la démarche de co-conception dans la construction de l'outil est d'autant plus intéressante du fait que l'outil d'évaluation sera ensuite utilisé dans le cadre de cette démarche. La participation des conseillers à la construction est aussi un moyen de rendre à ces derniers la structure de l'outil d'évaluation et son fonctionnement plus transparents et accessibles.

Ensuite, il faut noter que les conseillers techniques choisis travaillent sur un territoire commun où les systèmes de culture maraichers qu'ils observent ont des caractéristiques similaires et sont soumis aux mêmes problématiques. Ceci était nécessaire car l'outil d'évaluation construit vise à évaluer spécifiquement des systèmes maraichers sous abri dans le contexte du bassin de production provençal et donc sur un territoire limité. En revanche, ceci a certainement joué en faveur de la convergence des avis des conseillers. Les avis des conseillers se recoupant sur de nombreux points, nous avons considéré au bout du cinquième entretien que la confrontation de l'arbre à l'avis d'un autre conseiller n'apporterait pas plus d'informations entraînant la modification de la structure de l'arbre.

II.2.3) Déroulement des entretiens avec les experts

Les entretiens avec les conseillers ont été réalisés de manière individuelle. Une trame d'entretien (exemple en Annexe 2) avait été préparée pour chacun des entretiens, celle-ci ne correspond pas à un questionnaire, elle a simplement aidé à la structuration de la discussion conduite autour de l'arbre d'évaluation. Cette trame a été modifiée au fil des entretiens en fonction des informations obtenues lors des entretiens précédents. Des points qui ne nécessitaient pas le croisement des avis d'experts n'ont pas été conservés dans la trame d'un entretien à l'autre. En revanche, des éléments nécessitant le recoupement des points de vue pour affiner l'information ont été conservés dans la trame pour tous les entretiens.

Chaque entretien s'est déroulé en suivant les deux phases suivantes :

-Rappel sur le contexte de construction de l'outil d'évaluation et présentation au conseiller de la structure globale de l'arbre d'agrégation, du principe d'agrégation des critères dans l'arbre.

-Discussion avec le conseiller en reprenant chacune des branches principales, critère par critère. Les discussions portaient sur la place des critères dans l'agrégation, la description de ces critères, le choix de l'échelle de chacun des critères, le choix des pondérations des critères dans l'agrégation.

De plus, ces discussions sur la structure de l'arbre permettaient notamment pour les différentes techniques alternatives de recueillir le point de vue des conseillers sur les effets des différentes techniques sur les bioagresseurs.

Un compte-rendu a ensuite été rédigé après chacun des entretiens afin d'identifier les informations intéressantes entraînant des modifications de la structure de l'arbre et de mettre en évidence des points à éclaircir au cours de l'entretien suivant.

III) La phase de validation de l'outil d'évaluation construit

Dans le cas d'un modèle multicritère et qualitatif comme le notre, les démarches de validation classiques utilisées pour les modèles aux sorties quantitatives permettant la comparaison des simulations du modèles à des données quantitatives par des tests statistiques (méthode des moindres carrés, intervalle de confiance, analyse de corrélation) (Gros, 2000 ; Marcus *et al.*, 1998) ne sont pas applicables car les sorties du modèle correspondent à des données non mesurables (Pavé, 2005). A l'heure actuelle, il n'existe pas de méthodes standardisées pour valider les modèles multicritères et qualitatifs. Toutefois il est possible de s'inspirer de travaux réalisés sur des modèles de décision qui à l'instar du modèle d'évaluation proposé ici produisent des sorties qui ne sont pas mesurables. Pour ces modèles de décision, Loyce et al (2002) et Tchamitchian et al (2006) proposent des démarches relativement proches, consistant à vérifier la cohérence interne du modèle d'abord, la pertinence de ces sorties au regard des objectifs assignés au modèle ensuite. Nous adopterons donc ici une démarche similaire.

La première étape de validation, portant sur la cohérence interne du modèle consiste à confronter les sorties de l'outil sous forme d'évaluations à des données de « terrain » provenant d'enquêtes sur des systèmes de culture et de diagnostics pathologiques réalisés dans les tunnels de différents producteurs. Cette étape doit nous permettre de vérifier la cohérence des évaluations obtenues avec l'outil par rapport au comportement du système réel étudié en conditions réelles.

La deuxième étape vise à confronter les évaluations obtenues avec l'outil à l'avis de plusieurs conseillers lors d'une réunion finale. Cette étape vise donc à s'appuyer sur l'expérience et les connaissances proches de la réalité du terrain des conseillers techniques pour valider les sorties de l'outil.

III.1) Validation de l'outil d'évaluation à partir de données issues du « terrain »

III.1.1) Présentation des données

Des données de « terrain » collectées dans le cadre d'un travail de thèse récent (Collange, 2011) sur la gestion agronomique des bioagresseurs telluriques en maraîchage sous abri ont été mobilisées pour tenter de valider l'outil d'évaluation. Ces données correspondent à des informations obtenues par enquête chez différents producteurs provençaux en maraîchage sous abri et, d'autre part, à des suivis des niveaux d'infestation en nématodes et en champignons dans certains tunnels de ces mêmes producteurs. Les systèmes de culture concernés sont des systèmes maraîchers intensifs sous abris froids, principalement basés sur deux cultures, la salade implantée durant la période hivernale et le melon implanté au printemps. Les producteurs qui ont été choisis pour les enquêtes mettent majoritairement en place des techniques alternatives de gestion des bioagresseurs telluriques (solarisation, engrais vert, ou la combinaison des deux).

En ce qui concerne les enquêtes, elles portent sur les systèmes de culture mis en place sur les exploitations agricoles, avec des descriptions détaillées des itinéraires techniques suivis et des moyens de gestion des bioagresseurs telluriques mis en œuvre. Les données d'observations correspondent à des suivis des niveaux d'infestation en nématodes (mesure des indices de galles) et en pathogènes telluriques (pourcentage de plantes atteintes/tunnel) par tunnel sur la période 2007-2010. Les producteurs enquêtés sont au nombre de 10 et le nombre de tunnels suivis par producteur varie de 1 à 6, le nombre total de tunnels dont les niveaux d'infestation en bioagresseurs ont été suivis étant de 28. Nous disposons donc de données de différents types, de données d'enquête qui permettent d'avoir une description des systèmes de culture par agriculteur et du raisonnement mis en œuvre par ces derniers pour gérer les nématodes. Des données collectées au champ témoignent de l'évolution des bioagresseurs dans les tunnels au cours du temps, que l'on peut mettre en lien avec les pratiques culturales des agriculteurs.

III.1.1.1) Des données provenant d'enquêtes réalisées auprès d'agriculteurs

Les enquêtes ont permis de caractériser les 28 tunnels observés entre 2007 et 2010 ainsi que les pratiques culturales de chaque producteur. Ces informations regroupent tout d'abord une caractérisation physique du tunnel (localisation, orientation...) et une caractérisation du sol sur lequel est implanté le tunnel comme la texture du sol, le taux de MO. On y trouve ensuite la description détaillée des pratiques culturales (travail du sol, fertilisation, irrigation...), des pratiques de prophylaxie mises en œuvre, des techniques de gestion des bioagresseurs. Enfin, les successions culturales avec les cultures réalisées chaque année dans le tunnel, les dates de plantation et de récolte, les variétés utilisées sont présentées dans un dernier tableau. Toutes ces informations compilées caractérisent les systèmes de culture mis en place dans les tunnels dont l'évolution des niveaux d'infestation en bioagresseurs telluriques a été suivie.

III.1.1.2) Des données provenant d'observations en parcelles d'agriculteurs

Des observations dans les différents tunnels ont été réalisées entre 2007 et 2010. Ces observations correspondent à des diagnostics pathologiques réalisés sur chaque culture afin de déterminer le niveau des infestations au cours du temps et leur répartition dans les tunnels. Des protocoles différents ont été mis en place pour observer les infestations en nématodes d'une part, et en champignons du collet d'autre part, qui après identification s'avèrent être très majoritairement du *Sclerotinia*.

Pour le suivi d'infestations en nématodes à galle, une seule observation a été réalisée pour chacune des cultures d'un tunnel donné, en fin de culture une fois la récolte terminée puisque ces observations nécessitent l'arrachage des plantes échantillonnées. Les niveaux d'infestation en nématode ont été caractérisés par une notation qualitative de l'importance des galles sur le système racinaire (Zeck 1971) (cf Annexe 3). Les plants ont été échantillonnés selon une méthode testée et validée lors d'une étude précédente (Peyre, 2007).

Ce protocole d'observation des galles racinaires et de leur sévérité, a permis la création de cartes d'infestation des tunnels en nématodes à galle, réalisées par tunnel, pour chaque culture durant la

période de l'étude (2008-2010). Ces cartes d'indices de galle décrivent la répartition des niveaux d'infestation dans les tunnels et leur évolution temporelle. (Figure 11: Exemple de carte d'infestation en nématodes à galles sur melon).

En ce qui concerne le suivi des niveaux d'infestation en pathogènes telluriques dans les tunnels, les suivis des attaques ont été réalisés uniquement sur les cultures de salades présentes dans la succession car ces champignons ne causent que très rarement des dégâts sur les plants de melon. Contrairement aux nématodes, l'observation a été exhaustive, mais non individualisée : le tunnel est découpé en zones rectangulaires centrées sur l'emplacement des plants de melons et le nombre de plants atteint par un champignon du collet relevé pour chacune de ces zones (Collange, 2011). Ces observations ont permis d'obtenir un pourcentage de plantes atteintes par zone, ce qui a permis d'établir des cartographies d'infestation en champignons du collet pour chacun des tunnels (Figure 12: Exemple de carte d'infestation en champignons du collet sur salades).

III.1.2) Exploration et classification des données de terrain

III.1.2.1) Calcul d'indices d'infestation en nématodes

A partir des cartes représentant les infestations en nématodes ou en champignons du collet pour un tunnel donné et pour une culture donnée, nous avons calculé pour chacune de ces situations, un indice d'infestation témoignant du niveau d'infestation du tunnel. Pour les nématodes, les calculs ont combiné les sévérités et les infestations afin de différencier, entre tunnel présentant un nombre comparable de plants infestés, les infestations fortes des infestations faibles. Nous avons ainsi obtenu une sévérité conditionnelle caractérisant chaque culture de chaque tunnel (somme des indices de galle divisée par le produit de la sévérité maximale et du nombre de plants atteints). Le même mode de calcul a été utilisé pour caractériser les infestations en champignons. Nous avons ainsi obtenu une sévérité conditionnelle pour chacune des cultures de salade de chaque tunnel. Ces sévérités conditionnelles sont présentées dans le tableau en Annexe 4.

Enfin, la moyenne des infestations en nématodes à galles et la moyenne des indices infestations en champignons du collet a été calculée pour chacun des tunnels (Tableau 2).

III.2.1.2) Classification des tunnels selon leurs infestations : classification ascendante hiérarchique

Afin de comparer les niveaux d'infestation observés à l'évaluation de la qualité sanitaire réalisée par notre modèle d'évaluation qualitative, il est nécessaire de regrouper les tunnels en fonction de leurs infestations, en combinant les différents bioagresseurs telluriques. Pour cela nous avons réalisé, avec le logiciel R, une classification ascendante hiérarchique sur les indices moyens nématodes et champignons (Figure 13 en dos de page).

La classification ainsi obtenue permet de définir 13 classes de tunnels combinant différents niveaux d'infestation en nématodes, d'une part, en champignons du collet, d'autre part (Figure 14 en dos de page). Les niveaux correspondants à ces classes se répartissent ainsi :

- pour un indice d'infestation entre [0 et 0,05[=très faible
- pour un indice d'infestation entre [0,5 et 0,08[=faible
- pour un indice d'infestation entre [0,08 et 0,180]=modéré

- pour un indice d'infestation entre [0,180 et 0,3]=élevé
- pour un indice d'infestation entre [0,3 et +=très élevé

Les niveaux d'infestation en bioagresseurs associés aux tunnels à travers la classification donnent une idée des pressions en bioagresseurs liées à chaque système de culture sur une période de deux saisons culturales.

La classification ainsi obtenue est toutefois beaucoup plus précise que l'évaluation réalisée par le modèle proposé dans ce travail, modèle qui évalue les systèmes sur une échelle à trois niveaux. Afin de simplifier cette classification, les niveaux d'infestation en nématodes et en champignons du collet ont été combinés à l'aide des règles ci-dessous :

Niveau d'inf. en nématodes	Niveau d'inf. en champignons	Niveau d'inf. en bioagresseurs
très faible	très faible	très faible
très faible/faible	faible	faible
faible	très faible/faible	faible
modéré	faible/très faible	modéré
faible/très faible	modéré	modéré
modéré	modéré	modéré
élevé	très faible/faible/modéré/élevé	élevé
très	très élevé	élevé
faible/faible/modéré/élevé/très élevé	élevé	élevé

Une nouvelle classification a alors été obtenue, regroupant les tunnels dans 4 classes différentes correspondant à un niveau d'infestation très faible, faible, modéré ou élevé en bioagresseurs telluriques (Figure 15 en page dos de page).

III.1.3) Validation de la cohérence interne du modèle d'évaluation

III.1.3.1) Description et évaluation des systèmes suivis

Chacun des 28 systèmes suivis a été décrit par les éléments constituant son système de culture disponibles (succession, itinéraires techniques...). Toutefois ces informations ne suffisent pas à la description nécessaire pour réaliser l'évaluation multicritère, certaines n'ayant pas incluses dans les enquêtes réalisées par Collange (2011) (dont l'objectif n'était pas de faire fonctionner notre modèle mais d'établir des relations entre systèmes de culture et gestion des bioagresseurs telluriques). Les attributs d'entrée pour lesquels aucune information n'était disponible ont été paramétrés au niveau neutre, « acceptable ». Ces attributs sont les suivants :

- gestion du matériel infesté en cours de culture par les nématodes à galle et gestion du matériel infesté en cours de culture par les maladies telluriques pour la branche « gestion des bioagresseurs telluriques ».

-gestion de l'humidité du sol, pilotage de l'irrigation, Vers de terre, quantification de la biomasse microbienne et structure du sol pour la branche « gestion de l'environnement du pathogène »

Les valeurs des attributs d'entrée correspondant aux pressions en nématodes à galle et aux pressions en champignons ont été paramétrés respectivement à partir des indices d'infestation en nématodes à galle calculés avec la méthode présentée ci-dessus, mais sur les cultures de l'année 2008, considérée comme état initial des systèmes évalués et confrontés ensuite aux infestations observées les années suivantes.

L'évaluation de la qualité sanitaire est ensuite obtenue pour chacun des systèmes. Ces évaluations sont analysées dans DEXi à partir de représentations graphiques sous formes de radar, de tables -1/+1 présentant l'effet du changement d'une seule valeur d'un attribut sur l'évaluation finale et de tables présentant les points forts et les points faibles du système de culture évalué.

III.1.3.2). Confrontation des évaluations de la qualité sanitaire des systèmes de culture à la classification de ces systèmes sur les niveaux d'infestation en bioagresseurs

Au cours de cette étape, les évaluations de la qualité sanitaire des systèmes de culture ont été confrontées à la classification des systèmes de culture réalisées sur les niveaux d'infestation en bioagresseurs. L'objectif de cette confrontation est d'établir s'il y a des correspondances entre la qualité sanitaire d'un système évalué selon l'outil et le niveau d'infestation du tunnel où ce système de culture est en place.

Pour cela, l'hypothèse suivante est émise : si la classification des systèmes de culture selon les évaluations de la qualité sanitaire obtenues avec DEXi est concordante avec la classification sur les niveaux d'infestation observés alors on peut considérer que les évaluations des systèmes réalisées par le modèle multicritère sont cohérentes et caractérisent bien la qualité sanitaire de ces systèmes. Cette concordance est vérifiée par un test statistique qui consiste à vérifier que la correspondance entre les deux classifications disponibles (évaluation multicritère, classification sur les infestations) n'est pas le fruit du hasard. Pour cela un indice de concordance global est créé comme la somme des concordances individuelles. La concordance individuelle prend la valeur 1 lorsque, pour un système donné, les deux classifications sont en accord, ou une valeur nulle sinon. L'indice de concordance global peut donc varier entre 0 (désaccord total) et 28 (correspondance parfaite). Comme la distribution de fréquence de cet indice n'est pas connue, elle sera approchée par une technique de simulation (script pour R en Annexe 5) : les évaluations obtenues par les 28 systèmes sont redistribuées entre eux au hasard (ce qui crée une nouvelle classification des systèmes qui est issue d'un tirage aléatoire) et l'indice de concordance global est recalculé sur cette nouvelle classification des systèmes. Cette opération est répétée un très grand nombre de fois (10 000 fois), ce qui nous permet d'obtenir la distribution de fréquence des valeurs de l'indice de concordance global sous l'hypothèse d'une évaluation aléatoire des 28 systèmes. Le véritable indice de concordance global issu du modèle d'évaluation multicritère est ensuite calculé et positionné dans cette distribution « expérimentale » de cet indice. Si l'indice *vrai* se situe dans l'extrémité haute de cette distribution (au-delà du quantile 0.95 par exemple pour un niveau de risque alpha de 5%), c'est alors que la correspondance observée ne peut pas être attribuée à une distribution aléatoire des évaluations par le modèle multicritère. Pour réaliser ce test une première opération est nécessaire qui consiste à recoder numériquement les évaluations qualitatives obtenues par le modèle, d'une part, et par la classification hiérarchique, d'autre part.

Pour chacune des quatre classes de la classification sur les niveaux d'infestation, un chiffre est associé : « Elevé »=3 ; « Modéré »=2 ; « Faible »=1 et « Très faible »=1.

Il en est de même pour les valeurs qualitatives des évaluations de la qualité sanitaire des systèmes, « Mauvaise »=3 ; « Acceptable »=2 et « Bonne »=1.

III.2) Validation du fonctionnement du modèle d'évaluation final par un groupe d'experts lors d'une réunion finale

III.2.1) La démarche mise en œuvre

Cette deuxième étape de la phase de validation du modèle, consiste à conforter les évaluations de systèmes de culture émises par le modèle d'évaluation aux avis d'un groupe d'expert composé de conseillers techniques spécialisés en production maraîchère.

Les systèmes de culture évalués par le modèle sont réellement mis en place par des producteurs provençaux. Ce sont des systèmes de culture que les conseillers agricoles connaissent et dont ils ont pu observer les effets concernant la gestion des bioagresseurs telluriques. Cette démarche correspond à ce que l'on peut appeler une validation à « dire d'expert » qui permet de valider les représentations du modèle sur la base de l'expertise et de la connaissance de situations réelles.

En ce qui concerne le déroulement de la réunion, le principe de l'utilisation d'un outil d'évaluation des systèmes de culture dans le processus de co-conception de systèmes de culture innovants est rappelé aux conseillers, certains conseillers n'ayant pas assistés aux réunions précédentes. Ensuite, la structure générale de l'outil d'évaluation mis en place ainsi que son fonctionnement sont présentés. Puis, plusieurs évaluations de la qualité sanitaire de systèmes de culture sont exposées aux conseillers afin d'être discutées.

III.2.2) Le groupe d'experts

Le groupe d'experts est composé de 8 conseillers techniques spécialisés en maraichage travaillant pour les organismes locaux suivants : Chambre d'agriculture des Bouches du Rhône, Chambre d'agriculture du Vaucluse, CETA des maraichers de Chateaufort, APREL (Association Provençale de Recherche et d'Expérimentation en Légumes) et GRAB (Groupement de Recherche en Agriculture Biologique). Ces conseillers techniques participent au projet de co-conception de systèmes de culture innovants en maraichage sous abri conduit par l'unité d'Ecodéveloppement de l'INRA d'Avignon.

Parmi, les huit conseillers présents à la réunion, quatre ont été sollicités durant la phase de construction de l'outil, ils connaissent donc déjà en partie la structure de l'arbre d'évaluation. Les quatre autres conseillers présents ne connaissaient pas le modèle d'évaluation utilisé et le principe de fonctionnement de ce modèle.

III.2.3) Les systèmes de culture évalués

Les évaluations présentées lors de la réunion portent dans un premier temps sur des systèmes de culture réellement mis en place par des producteurs maraichers locaux, puis dans un second temps sur des modèles de systèmes de culture dont les caractéristiques ont été définis par le groupe de co-conception lors de réunions précédentes

III.2.3.1) Les évaluations des systèmes de culture réels

Les trois premières évaluations présentées ont été obtenues lors de l'étape précédente de validation du modèle à partir des données de « terrain ». Les systèmes évalués correspondent donc à des systèmes de culture ayant réellement été mis en place par des agriculteurs. Trois cas différents ont été sélectionnés pour être présentés aux conseillers. Le premier cas correspond à un système de culture dont la qualité sanitaire a été évalué comme « mauvaise », le deuxième cas correspond à un système de culture évalué comme ayant une qualité sanitaire « acceptable » et le troisième cas est celui d'un système ayant une « bonne » qualité sanitaire.

III.2.3.2) Les évaluations de prototypes de systèmes de culture

Les modèles M1 et M2 correspondent à des cadres fixes de systèmes de culture définis par les chercheurs menant le projet de co-conception en collaboration avec les conseillers participant au groupe de travail. Au sein de ces modèles peuvent être intégrées différentes techniques alternatives de gestion des bioagresseurs permettant de créer des systèmes de culture qui pourront être évalués par l'outil d'évaluation.

Le modèle M1 correspond à un système de culture mis en place au sein d'exploitations agricoles maraichères très contraintes de par leurs débouchés commerciaux. Dans ce type de système de culture, le créneau disponible pour mettre en place des techniques alternatives de gestion des bioagresseurs telluriques est restreint (juillet-août). Les successions culturales mise en place dans ce type de système de culture sont des successions salade-salade-melon.

Le modèle M2 correspond à un système de culture mis en place au sein d'exploitations agricoles maraichères ayant plus de marge de manœuvre. Pour ce type de système de culture, les cultures implantées sont une culture de salade en hiver et une culture de tomates de mars-avril à fin août. Un créneau automnal de trois mois est alors disponible pour mettre en place une technique alternative.

Pour chacun de ces modèles de systèmes de culture connus des conseillers techniques, différentes techniques alternatives de gestion des bioagresseurs telluriques ont été intégrées dans les systèmes de culture et ces systèmes de culture ont été ensuite évalués par le modèle d'évaluation.

- Pour le modèle M1, l'intégration d'une technique de biodésinfection dans le système de culture durant le créneau estival a été testée. Deux modalités pour cette technique ont été testées ; la première modalité correspond à l'implantation d'un engrais vert nématicide court dont la quantité enfouie est faible combiné à un bâchage court permettant le piégeage des substances biocides mais n'ayant pas d'effet prolongé de montée de température dans le sol. La deuxième modalité est l'apport l'épandage d'un amendement organique nématicide (tourteaux de neem par exemple) à une forte dose suivi d'un bâchage long (1 mois et demi à 2 mois) permettant le piégeage des substances biocides et ayant un effet solarisation.
- Pour le modèle M2, différentes modalités pour l'intégration d'un engrais vert dans le système de culture durant le créneau disponible en automne ont été testées. La première modalité correspond au cas où aucun engrais vert n'est implanté. La deuxième modalité correspond à l'implantation d'un engrais vert de type Sorgho fourrager n'ayant pas d'effet

biocide. La troisième modalité est l'intégration d'un engrais vert aux propriétés biocides (riche en HCN) dans la succession culturale.

Cinq systèmes de culture (2 systèmes avec le modèle M1 et 3 systèmes avec le modèle M2) sont évalués en utilisant le modèle multicritère. Des caractéristiques générales de ces systèmes de culture similaires sont paramétrées pour chacun des modèles, on considère que les pratiques de prophylaxie mises en œuvre sont moyennes, que les niveaux de pression en nématodes et en champignons sont modérés et que chaque technique est réalisée à une fréquence annuelle.

Partie 3 : Résultats

I) Phase de construction : Les modifications apportées à la structure par confrontation de l'arbre d'évaluation avec les experts

Les discussions autour de la structure de l'arbre lors d'entretiens avec différents conseillers techniques ont permis la mise en évidence de points à modifier dans la structure de base de l'outil construite uniquement sur des connaissances issues de la littérature scientifique. Les conseillers techniques par leurs expériences de situations réelles et leurs observations de la gestion des bioagresseurs par différentes pratiques culturales dans des cas concrets ont pu proposer des modifications de l'arbre, remettre en question le choix de certains critères ou simplement valider certaines parties de l'arbre.

Cinq types de résultats correspondant à des situations ayant émergé des discussions autour de la structure de l'arbre d'évaluation ont été mis en évidence.

I.1) Remise en question d'éléments intégrés dans l'arbre et issus de la littérature scientifique par l'expérience et les connaissances des acteurs de « terrain »

Dans ce premier type de situation, les experts remettent en question l'utilité de certains attributs. Leurs connaissances des systèmes maraichers sous abri provençaux leur permettent de juger de l'utilité de certains attributs intégrés dans la structure de l'outil. Ainsi des éléments qui pouvaient sembler intéressants à prendre en compte dans la structure de l'arbre au regard de la littérature scientifique ont été remis en question par les experts car considérés comme non adaptables au cas des systèmes maraichers provençaux. Par exemple, dans la branche gestion des bioagresseurs telluriques et plus précisément sous un attribut agrégé correspondant à la perturbation du cycle fongique, un attribut d'entrée appelé « effet filtre » avait été intégré à l'arbre. Cet attribut correspondait à l'utilisation d'un film plastique coloré filtrant la lumière bleue et absorbant les UV grâce à des additifs contenus dans le plastique, comme film de couverture des tunnels. Cette pratique se base sur des expérimentations in vitro qui ont mis en évidence un effet inhibiteur de la lumière bleue et stimulateur des rayons UV sur la sporulation de deux pathogènes telluriques : *Botrytis cinerea* et *Sclerotinia sclerotinium*. L'utilisation des films colorés s'est développée en Israël et en Espagne mais pas encore en France. Après discussion avec les conseillers cet attribut a été supprimé, car cette pratique n'est pas du tout mise en œuvre en France et d'après eux elle a pour l'instant peu de chances de voir le jour dans les systèmes maraichers provençaux.

On peut aussi citer l'exemple d'un autre attribut remis en question par les conseillers, il s'agit du « type d'irrigation » dans une partie de l'arbre sur la gestion du microclimat dans le sol. Cet attribut était qualifié de « mauvais » lorsque le type d'irrigation mis en place correspondait à une irrigation par aspersion ou à la raie et « bon » lorsqu'il s'agissait de goutte à goutte. Le choix de la modalité de cet attribut était problématique car les deux types d'irrigation sont employées au cours d'une saison culturale, les salades sont irriguées par aspersion alors que les cultures de printemps (melons, tomates...) sont irriguées par goutte à goutte. De plus, d'après les conseillers, les problèmes de maladies liées à l'irrigation par aspersion concernent principalement les maladies du feuillage et non les maladies telluriques. Cet attribut a donc été supprimé de la structure de l'arbre.

Les désaccords des conseillers avec la structure de l'arbre n'ont pas seulement concernés le choix des attributs mais ils portaient parfois sur le choix des échelles pour un attribut donné et les descriptions de ces échelles. Par exemple, pour un attribut d'entrée concernant la période de mise en place de la solarisation dans une partie de l'arbre sur les conditions d'installation de la solarisation, la description de l'échelle a été discutée par les conseillers. La modalité « inadaptée » correspondait à une mise en place avant le 1^{er} Mai, la modalité « acceptable » à une mise en place sur une période allant du 1^{er} mai au 15 juin et enfin la période de mise en place « optimale » s'étalait du 16 juin au 31 juillet. Les conseillers ayant une bonne connaissance du climat local, ont proposé une réadaptation de la description de l'échelle au cas des systèmes maraichers provençaux. La description est alors devenue la suivante : « inadaptée » : mise en place avant le 1^{er} juin et après le 25 juillet ; « acceptable » mise en place du 1^{er} juin au 14 juin et du 16 juillet au 25 juillet ; « optimale » : mise en place entre le 15 juin et le 15 juillet.

Les conseillers par leurs connaissances concrètes apportent des modifications à la structure de l'arbre d'évaluation qui favorisent l'adaptation de celui ci au cas particulier des systèmes de culture en maraichage sous abri mis en place en Provence.

1.2) Avis des experts confortant la structure de l'arbre théorique

Dans cette situation, les conseillers étaient en accord avec des parties de la structure de l'arbre construites uniquement à partir de la littérature scientifique. Une partie importante de la structure de l'arbre théorique a été confortée par les conseillers techniques, dans cette situation les conseillers étaient en accord avec le choix des attributs, leurs agencements dans l'arbre, le choix des échelles ou encore la description des différentes classes des échelles. La structure globale de l'arbre constituée de trois branches principales représentant différentes voies de gestion des bioagresseurs telluriques par le système de culture a été validée par les conseillers. En effet, la décomposition de ces différentes voies de gestion en différents attributs situés dans le haut de la structure de l'arbre n'a pas été remise en question par les conseillers.

En ce qui concerne les attributs d'entrée du modèle, un grand nombre a été validé par les conseillers. Par exemple la description par plusieurs attributs des pratiques de prophylaxie a été jugée valide et complète par les conseillers. Ces attributs correspondent à la gestion des sources potentielles d'infestation pour les différents bioagresseurs (gestion des résidus de culture et gestion des adventices) et à des pratiques concernant les outils de travail du sol (nettoyage des outils entre le travail de deux parcelles différentes, travail des parcelles saines avant les parcelles infestées).

On peut citer un autre exemple d'accord des conseillers avec la structure de l'arbre concernant cette fois la description des échelles de valeurs de plusieurs attributs. Il s'agit des attributs de fréquences d'utilisation des techniques létales, pour chacune des techniques la description faite d'une fréquence d'utilisation « insuffisante » correspondait à une fréquence d'utilisation de la technique d'un an sur trois, une fréquence « acceptable » à une fréquence d'utilisation d'un an sur deux et une fréquence « optimale » à une fréquence d'utilisation annuelle. Les conseillers ont considérés la description de cette échelle de valeurs comme valide.

1.3) Apports d'éléments par les experts absents dans la littérature scientifique

Les conseillers sollicités ont pu par moment apporter des connaissances provenant de leurs observations chez les producteurs et de leur expérience. Ces connaissances n'étaient pas prises en compte dans la structure de l'arbre construit à partir de la littérature scientifique. Par exemple, sur les effets des techniques alternatives de gestion des bioagresseurs telluriques et de leurs combinaisons au sein de systèmes de culture, les connaissances présentes dans la littérature scientifique sont encore lacunaires. Ainsi, les conseillers ont pu apporter des connaissances empiriques sur les effets sur les bioagresseurs telluriques de certaines de ces techniques alternatives aux traitements chimiques ou sur la combinaison de plusieurs de ces techniques en se basant sur leurs observations en parcelles d'agriculteurs. Ces connaissances empiriques sur les effets des techniques ont été intégrées dans la structure de l'arbre au niveau de la définition des règles d'agrégation des critères.

Par exemple, il est ressorti des entretiens que pour l'ensemble des conseillers, la technique alternative aux produits de désinfection chimique du sol semblant être la plus efficace est la solarisation. D'après ces derniers, la réalisation de la solarisation avec des conditions de mise en œuvre optimale permet une bonne action létale sur les maladies telluriques et une action létale correcte sur les nématodes à galle. Ces effets de la solarisation décrits par les conseillers ont été pris en compte dans la structure de l'arbre. Pour chaque technique létale décrite dans l'arbre, un attribut correspondant aux conditions de mise en œuvre de la technique s'agrège avec deux attributs correspondant aux pressions en nématodes à galle et en maladies telluriques présentes dans le tunnel au moment de la réalisation de la technique. L'agrégation des conditions de mise en œuvre d'une technique avec les pressions en bioagresseurs, permet de tenir compte de l'influence du niveau d'infestation sur l'efficacité d'une technique létale. C'est donc au niveau de l'agrégation de ces trois attributs que la solarisation a pu être paramétrée comme une technique efficace.

Un autre exemple qui peut être cité, concerne l'effet sur les bioagresseurs d'une combinaison de techniques alternatives. Certains conseillers ont pu observer chez des producteurs le bon effet létal sur les bioagresseurs de la combinaison d'un apport de tourteau nématocide (mélange ricin/neem) et d'une solarisation à fréquence annuelle. L'apport de tourteau nématocide permet la gestion de la population de nématodes et la solarisation réduit les populations des pathogènes telluriques *Sclerotinia* et *Botrytis*.

1.4) Apports d'éléments manquants dans la structure de l'arbre par les conseillers techniques et décrits dans la littérature scientifique

Certains éléments manquants dans la structure de l'arbre mais tout de même décrits dans la littérature scientifique ont pu être mis en évidence par les conseillers. Par exemple, l'utilisation de

traitements biologiques dans les actions létales n'avait pas été prise en compte dans la structure de l'arbre. On retrouve des informations dans la littérature scientifique sur les traitements biologiques de type Contans WG à base de *Coniothyrium minitans* qui permettent en particulier une action létale sur *Sclerotinia spp.* Un attribut d'entrée « traitement biologique » a par conséquent été ajouté à la structure de l'arbre.

Cette situation a été peu fréquente car le travail de bibliographie réalisé en amont pour développer la structure de l'arbre théorique était relativement important.

I.5) Cas où des informations sont absentes dans la littérature scientifique et où les conseillers ne peuvent pas apporter d'informations supplémentaires.

Pour certains éléments de la structure de l'arbre, les connaissances scientifiques sont encore peu fournies et les conseillers ne pouvaient pas combler les lacunes des connaissances scientifiques par des connaissances issues du « terrain ». Pour l'exemple lorsque les conseillers ont été interrogés sur leurs connaissances des effets sur les bioagresseurs de la biodésinfection (combinaison d'un apport d'amendement organique et d'un bâchage du sol), ces derniers n'ont pas pu répondre. En effet, la biodésinfection est une technique alternative en cours de développement très peu pratiquée par les agriculteurs pour le moment, les conseillers n'avaient pas le recul nécessaire sur cette technique pour pouvoir juger de son efficacité.

II) Phase de validation de l'outil

II.1) Résultats de la confrontation des données d'observations et d'enquêtes avec les sorties de l'outil

II.1.1) Analyse des évaluations des différents systèmes de culture obtenues avec le modèle

Dans le paragraphe suivant, nous allons détailler les évaluations de la qualité sanitaire des systèmes de culture issues du modèle et ainsi déterminer si la construction de ces évaluations est cohérente par rapport aux données d'entrée paramétrées dans le modèle. Pour cela les évaluations obtenues dans chacune des branches principales de l'arbre sont décortiquées à l'exception de celles obtenues pour la branche gestion de l'environnement du pathogène qui sont similaires étant donné que les attributs pour cette branche ont été paramétrés de la même façon pour tous les systèmes de culture.

En observant les évaluations de la qualité sanitaire des 28 systèmes de culture obtenues à partir du modèle, on constate que pour 15 systèmes de culture la qualité sanitaire est jugée « acceptable », pour 10 systèmes celle-ci est considérée comme « bonne » et enfin pour 3 systèmes de culture, elle est qualifiée de « mauvaise » (Figure 16).

- Les systèmes classés comme ayant une qualité sanitaire « mauvaise » (Si2, Me1 et Me2) sont des systèmes où la branche correspondant à la gestion des bioagresseurs telluriques est évaluée par l'outil comme « mauvaise ». Ces trois systèmes de culture sont les trois seuls cas où la « gestion de l'inoculum » et la « gestion du cycle » sont qualifiées de « mauvaise ».

Pour les systèmes Me1 et Me2, les potentiels infectieux en bioagresseurs paramétrés sont élevés. En effet pour Me1 la pression en nématodes à galle a été paramétrée comme « élevée » et la

pression fongique comme « modérée » et pour Me2 les pressions en bioagresseurs sont toutes deux paramétrées comme « modérée ». Pour ces deux systèmes de culture, aucune pratique n'est mise en œuvre pour gérer les bioagresseurs telluriques alors que le potentiel infectieux est important. Cela signifie qu'il n'y a pas de techniques mises en place permettant d'affecter l'inoculum en bioagresseurs présent dans le sol ou pour créer une rupture dans les cycles des bioagresseurs.

Par conséquent, il semble logique que l'outil ait évalué comme mauvais ses systèmes de culture du point de vue de la gestion des bioagresseurs.

Les branches concernant la gestion de l'environnement des bioagresseurs et la gestion de la sensibilité de la culture sont respectivement évaluées comme « acceptable » et « bonne » mais cela ne suffit pas pour obtenir un jugement « acceptable » de la qualité sanitaire puisque la branche gestion du bioagresseur tellurique a plus de poids que les deux autres branches dans l'agrégation des trois branches.

Pour le système de culture Si2, la pression en nématodes à galle est « modérée » et la pression fongique est « élevée ». Pour ce système de culture, la seule technique létale utilisée pour gérer les bioagresseurs est l'enfouissement de tourteau de Ricin ayant potentiellement un effet nématocide, mais compte tenu du potentiel infectieux en bioagresseurs présent dans le sol du tunnel, cette pratique culturale n'est pas suffisante pour réduire l'inoculum. De plus, l'effet létal du tourteau de Ricin concerne principalement les nématodes à galle et non les pathogènes telluriques. Dans le tunnel en question, la pression fongique est élevée, il est donc évident que l'utilisation du tourteau nématocide seule n'est pas suffisante pour détruire les foyers d'infestation en champignons du collet. L'évaluation de la branche « gestion des bioagresseurs telluriques » proposée par l'outil semble donc cohérente.

- En ce qui concerne les systèmes de culture dont la qualité sanitaire est évaluée comme « acceptable », les trois branches principales de l'arbre d'évaluation sont elles aussi évaluées comme « acceptable ».

L'ensemble des systèmes de culture dont la qualité sanitaire est évaluée comme « acceptable » (Ca4, Ca2, Ca9, Je2, Je5, Je3, Ca7, Ma4FE, Ni5, Ca3, Ma4DE, Ma6DE, Ma8FE, Ga13) présente une construction similaire de l'évaluation « acceptable » obtenue pour la branche « gestion de la sensibilité de la culture ». En effet pour ces systèmes de culture, l'évaluation de la « gestion de la sensibilité de la culture » est entraînée vers le niveau « acceptable » par des choix variétaux qualifiés de « mauvais » par l'outil. Ces choix variétaux sont considérés comme « mauvais » car les cultures implantées dans les successions culturales pour ces systèmes de culture sont sensibles et présentent de forts risques d'infestation en nématodes à galle et en champignons du collet (cultures de melons, cultures de salades au port peu érigé et non aéré).

Pour la branche « gestion des bioagresseurs telluriques », l'évaluation des systèmes de culture est au niveau « acceptable ». Pour l'ensemble de ces systèmes de culture, la gestion de l'inoculum en bioagresseurs présents dans le sol est « mauvaise » mais celle-ci est compensée par une bonne gestion des bioagresseurs au niveau de leurs cycles de développement, ce qui permet d'obtenir un niveau « acceptable » pour l'évaluation de la gestion des bioagresseurs.

En revanche, la construction de l'évaluation « mauvaise » pour la branche « gestion de l'inoculum » diffère quelque peu selon les systèmes de culture.

Tout d'abord, pour les tunnels Ni24, Ni5, une culture de sorgho est implantée chaque année à l'interculture dans les tunnels comme engrais vert. Cet engrais vert ne présentant pas de propriétés biocides, l'action létale sur les bioagresseurs conférée par cette pratique est nulle. Dans les cas suivants, l'implantation d'un engrais vert de type sorgho est la seule pratique de gestion des bioagresseurs, l'attribut « action létale » est donc évalué comme mauvais. De plus, l'attribut « prophylaxie » est lui aussi jugé « mauvais » par l'outil pour chacun de ces systèmes, car aucune mesures prophylactiques comme le nettoyage des outils de travail du sol ou la définition d'un ordre de travail des parcelles ne sont mises en œuvre. L'action létale et la prophylaxie pour ces systèmes de cultures étant mauvaises, il est logique que la gestion de l'inoculum soit considérée comme « mauvaise » quelque soit le niveau d'infestation en bioagresseurs.

Pour le tunnel Ca2, l'action létale sur l'inoculum est permise par la mise en place d'une solarisation une année sur deux et l'épandage d'un tourteau nématocide chaque année. Pour ce cas, l'action létale est évaluée comme « acceptable » car les conditions de mise en œuvre de la solarisation ne sont pas parfaites. En effet, la période d'installation de la solarisation est mauvaise (mise en place après le 25 juillet), ce qui signifie que la technique de désinfection des sols n'est donc pas pratiquée de façon optimale. De plus, la fréquence de mise en œuvre est d'une année sur deux puisque celle-ci est alternée avec un engrais vert. La solarisation nécessite une fréquence d'utilisation annuelle pour avoir bon effet sur les bioagresseurs telluriques, la fréquence d'utilisation de la solarisation dans le système Ca2 est donc considérée comme « acceptable » et non « bonne ».

Malgré, une action létale « acceptable » conférée par ce système, la gestion de l'inoculum est « mauvaise » car les mesures prophylactiques ne sont pas mises en œuvre.

Pour les systèmes de culture Ca3, Ca7 et Ga13, la solarisation est pratiquée et elle est considérée comme « acceptable » comme pour Ca2. Mais pour ces systèmes les niveaux d'infestation en bioagresseurs sont modérés ou élevés, par conséquent la solarisation est jugée comme « mauvaise » car pour des niveaux d'infestations importants, une solarisation dont les conditions de mise en œuvre ne sont pas optimales n'est pas assez efficace pour gérer les populations de bioagresseurs. Dans le cas de Ca7 et Ca3, les conditions de mise en œuvre ne sont pas bonnes car la période de mise en place de la solarisation est inadaptée alors que dans le cas de Ga13, la durée d'implantation de la technique est inadaptée.

Ensuite pour les systèmes de culture Ca9 et Ca4, les niveaux d'infestation en bioagresseurs étant faibles l'utilisation de tourteau biocide suffit pour obtenir une action létale « acceptable » sur l'inoculum mais les pratiques de prophylaxie étant jugée « mauvaises », l'attribut « gestion de l'inoculum » est lui aussi jugé comme mauvais.

Enfin, pour les systèmes de culture Ma4FE, Ma4DE, Ma6DE, Ma8FE les pratiques de prophylaxie mises en place sont évaluées comme « acceptable » car les sources potentielles d'infestation en bioagresseurs sont bien gérées (les résidus de culture sont sortis des tunnels et brûlés...).

Mais la gestion de l'inoculum est tout de même évaluée comme mauvaise car la seule technique de gestion des bioagresseurs mise en œuvre dans ces systèmes de culture dont les niveaux d'infestation sont modérés ou élevés correspond à l'implantation d'un engrais vert de type sorgho. Cet engrais vert n'est bien entendu pas suffisant pour gérer des pressions fongiques et en nématodes importantes.

Si on observe ces différentes évaluations, on constate qu'elles sont cohérentes et fondées.

- Pour les systèmes de culture dont la qualité sanitaire est évaluée comme « bonne », on relève deux cas de figure qui permettent d'obtenir une qualité sanitaire jugée comme « bonne » ;

Dans le premier cas, la branche « gestion des bioagresseurs telluriques » évaluée comme « bonne » permet d'obtenir une bonne qualité sanitaire étant donné que les deux autres branches principales de l'arbre sont évaluées comme « acceptable ». Ceci est le cas de deux systèmes de culture (Ca1 et Li8).

Pour, le système de culture Ca1, la pratique d'une solarisation chaque année combinée à l'apport de tourteau nématocide permet l'obtention d'une bonne action létale d'autant plus que le niveau d'infestation en bioagresseurs est faible. Pour ce système, les conditions de mise en œuvre de la solarisation sont évaluées comme « acceptable » car la période d'implantation de la technique est inadaptée. Mais, l'action létale conférée par ce système est tout de même évaluée comme « bonne » car, d'une part, le niveau d'infestation en bioagresseurs est faible et, d'autre part la solarisation est pratiquée à une fréquence annuelle en association avec l'apport de tourteau. Pour un niveau d'infestation élevé en bioagresseurs, l'évaluation de la qualité sanitaire de ce système basculerait vers le niveau « acceptable ».

L'action létale étant bonne malgré des mauvaises pratiques de prophylaxie, l'attribut « gestion de l'inoculum » est jugée « acceptable ». Cet attribut s'agrège avec l'attribut « gestion du cycle » qui lui est bon compte tenu de la rupture du cycle conférée par la solarisation. On obtient alors une « gestion des bioagresseurs telluriques » évaluée comme « bonne ».

Pour le système de culture Li8, la réalisation d'une solarisation à une fréquence d'une année sur deux dans les conditions optimales permet une « bonne » action létale mais des pratiques de prophylaxie n'étant pas mises en œuvre, la gestion de l'inoculum est évaluée comme « acceptable » par l'outil. L'attribut « gestion du cycle » est en revanche évalué comme bon puisqu'en alternance avec la solarisation est pratiqué un engrais vert de type sorgho qui permet la rupture des cycles des bioagresseurs. L'agrégation de « gestion de l'inoculum » et de « gestion du cycle » permet d'obtenir une évaluation de la qualité sanitaire de Li8 qualifiée de « bonne » pour la branche « gestion des bioagresseurs telluriques ».

Le deuxième cas correspond à celui des systèmes de culture Ni12, Ni16, Bo8, Bo3, Sa5, Sa6, Sa8 et Bo19. La branche « gestion de la sensibilité de la culture » évaluée comme « bonne » permet d'obtenir une bonne évaluation de la qualité sanitaire des systèmes alors que les autres branches « gestion de l'environnement du pathogène » et « gestion des bioagresseurs telluriques » sont qualifiées d' « acceptable ».

Pour ces systèmes de culture, la branche gestion de la sensibilité de la culture est évaluée comme « bonne » car pour chacun des systèmes de culture concernés, l'attribut « choix variétal » est qualifié de bon. Cet attribut correspond au choix des variétés de culture implantées vis-à-vis du risque d'infestation en nématodes à galle ou en champignons pathogènes. Ces systèmes de culture sont évalués comme présentant des choix de culture bons pour la gestion de la sensibilité de la culture face aux bioagresseurs pour deux raisons. Tout d'abord, les salades implantées dans les successions culturales sont de type Batavia, cette variété confère aux salades un port érigé et bien aéré limitant les infestations en maladies fongiques. Ensuite, dans les systèmes de culture suivants aucune culture de type melon, fortement hôte des nématodes à galle n'est implantée au printemps, ce qui réduit les risques d'infestation en nématodes.

II.1.2) Confrontation des évaluations de la « qualité sanitaire » des systèmes de culture à la classification sur les niveaux d'infestation en bioagresseurs telluriques.

Les évaluations de la qualité sanitaire obtenues pour chacun des systèmes de culture sont confrontées aux classes sur les niveaux d'infestation des systèmes dans le Tableau 3. Les valeurs qualitatives ont été ensuite transformées en valeurs numériques afin de pouvoir appliquer une méthode statistique, on obtient alors le Tableau 4 utilisable dans le logiciel statistique R.

A partir du Tableau 4, la valeur de l'indice global de concordance vrai est calculée. On obtient une valeur de 12.

Cette valeur est placée sur un histogramme représentant la distribution expérimentale de cet indice sous l'hypothèse d'une évaluation aléatoire (Figure 17 en dos de page). Des quantiles sont alors calculés, le quantile 0,90 est égal à la valeur 13, ce qui signifie que 90 % de la population des indices générés prennent une valeur inférieure à 13. L'indice vrai prenant la valeur 12 correspond au quantile 85. Il ne fait donc pas partie des 10% de la population qui permettent d'affirmer de façon significative que les évaluations émises par le modèle d'évaluation sont en accord avec la réalité. On considère d'après ce test statistique que l'on ne peut pas rejeter avec une grande certitude l'hypothèse d'une évaluation aléatoire de nos systèmes, ce qui ne permet donc pas la validation de la cohérence des évaluations du modèle par les observations des niveaux d'infestations.

II.2) Résultats d'évaluation avec les modèles de systèmes de culture connus des conseillers (Réunion de validation finale)

II.2.1) Avis du groupe d'experts sur les évaluations des systèmes réels

Pour le premier système (Me1) dont la qualité sanitaire est évaluée comme « mauvaise », la raison principale qui entraîne une telle évaluation par le modèle est le fait qu'aucune technique létale n'est mise en œuvre au sein de ce système de culture alors que le niveau de pression en nématodes est évalué comme « élevée ». La construction de l'évaluation est présentée à travers différents radars, et les conseillers sont d'accord avec l'évaluation obtenue.

Le deuxième système de culture (Ca3) dont la qualité sanitaire est jugée « acceptable » est commenté par les conseillers. Ce système de culture est principalement évalué comme « acceptable » car l'action létale sur l'inoculum en bioagresseurs est « acceptable ». Cette action létale est moyenne car la technique de solarisation utilisée est jugée « inadaptée ». La solarisation est considérée « inadaptée » par le modèle car la technique culturale est mise en place tardivement par rapport à la période de mise en place optimale pour cette technique (mi juin à mi juillet).

Les conseillers considèrent que la solarisation ne doit pas être jugée comme « inadaptée » simplement parce que la période de mise en place de la technique est inadaptée.

En fait, la valeur « inadaptée » attribuée par le modèle à la technique n'est pas simplement due à une mise en place tardive de la technique, une pression « élevée » en nématodes à galle pour ce système de culture entre aussi en compte. La solarisation est qualifiée d'« inadaptée » pour des

conditions de mise en œuvre « inadaptées » agrégées avec une pression en nématodes à galle élevée. Si la pression en nématodes à galle avait été « faible », la solarisation aurait été jugée « acceptable » par le modèle malgré une mise en place tardive de la technique.

Les conseillers après ces explications ont accepté l'évaluation « acceptable » pour ce système de culture.

Pour le troisième système de culture dont l'évaluation de la qualité sanitaire est « bonne », la combinaison de plusieurs techniques alternatives de gestion permet la bonne gestion au niveau de l'inoculum en nématodes et en champignons telluriques qui sont respectivement élevés et faibles. Une solarisation réalisée dans les conditions optimales combinée est mise en place une année sur deux en alternance avec un engrais vert de type sorgho et un apport de tourteau nématocide est réalisé à fréquence annuelle. Les bioagresseurs sont donc gérés au niveau de l'inoculum par une action létale de la solarisation et du tourteau et au niveau du cycle l'implantation d'un engrais vert une année sur deux permet de créer une rupture de cycle pour les bioagresseurs.

Pour ce système évalué comme bon du point de vue de la gestion des bioagresseurs, les conseillers ont fait une remarque intéressante qui met en évidence un dysfonctionnement dans l'évaluation en question. En effet, la succession culturale pour le système de culture est une succession de type salade-salade-melon. Pour une telle succession, si une solarisation est pratiquée de façon optimale pendant la période estivale cela signifie que celle-ci est mise en place entre mi juin et mi juillet, et que la culture de melon est arrachée fin juin au maximum. Pour pouvoir réaliser une succession culturale avec deux salades et un melon arraché tôt en été, il faut que la première salade soit implantée en septembre ou début octobre. En cette période de début d'automne, les conditions climatiques dans le sud est de la France sont encore chaudes, le sol est encore chaud et les populations de nématodes sont encore virulentes. Cela signifie que si une première salade est implantée en septembre, le développement de la population de nématodes pourrait être favorisé par la présence de cette culture hôte et les dégâts sur la culture peuvent être conséquents.

Le même système de culture mais sans la première salade dans la succession culturale aurait en revanche toutes les raisons d'être évalué par le modèle comme bon au niveau de la qualité sanitaire.

Les conseillers considèrent donc que la qualité sanitaire du système de culture en question n'est pas bien évaluée par le modèle. Cette remarque importante est donc à prendre en compte pour améliorer la qualité d'évaluation de l'outil.

II.2.2) Avis du groupe d'experts sur les évaluations des modèles M1 et M2

Pour le prototype de systèmes de culture créé à partir du modèle M1 comprenant la mise en place d'un engrais vert biocide court suivi d'un bâchage court, l'évaluation est « acceptable » car malgré une dose faible de matière fraîche pour l'engrais vert et un bâchage ne permettant pas la montée de température dans le sol, la présence de l'engrais vert durant un mois peut permettre de créer une rupture de cycle pour les bioagresseurs. Le deuxième prototype créé à partir du modèle M1 est évalué comme ayant une « bonne » qualité sanitaire car l'effet nématocide du tourteau apporté à une dose optimale combiné à un bâchage long ayant à la fois un effet de confinement et de solarisation permet une bonne action létale sur l'inoculum de bioagresseurs telluriques présents dans le sol.

Pour les prototypes de systèmes de culture créés en intégrant différentes modalités d'engrais vert dans la succession culturale, les évaluations de la qualité sanitaire obtenues forment une gradation.

En effet, l'évaluation de la qualité sanitaire du système n'intégrant pas d'engrais vert est « mauvaise », celle du système intégrant un engrais vert de type sorgho fourrager sans action biocide est « acceptable » et celle du système intégrant un engrais vert biocide est jugée « bonne ».

Les avis des conseillers sur la qualité sanitaire des prototypes de systèmes créés à partir du modèle M1 et M2 sont concordants avec les évaluations obtenues à partir du modèle. Ceci constitue donc une forme de validation du fonctionnement du modèle d'évaluation et de ses sorties.

D'un point de vue global, les évaluations des différents systèmes de culture présentées aux conseillers ont été confortées par les conseillers. Un dysfonctionnement au niveau de l'évaluation d'un système de culture a cependant été mis en évidence, il sera donc nécessaire d'améliorer l'outil sur ce point précis afin que celui-ci propose une évaluation la plus fiable possible. De plus, il semble nécessaire d'évaluer des systèmes de culture comprenant des successions culturales différentes des seules successions à base salade et de melon testées ici.

Partie 4 : Discussion

I) Discussion sur la démarche de construction et de validation du modèle d'évaluation multicritère et qualitatif

I.1) La démarche de confrontation de l'arbre théorique d'évaluation à l'avis de conseillers techniques

Tout d'abord, il faut souligner que la démarche de confrontation de la structure de l'arbre théorique à l'avis des différents conseillers techniques a clairement favorisé un enrichissement et une amélioration de la structure de l'arbre d'évaluation. Au cours de cette démarche, l'ensemble des connaissances scientifiques ayant servi à construire une première structure d'arbre, d'évaluation ont été complétées par des connaissances non formalisées dans la littérature, provenant de l'expérience des acteurs du « terrain ». Les connaissances des conseillers issues en partie de leurs observations des systèmes de culture en conditions réelles peuvent être qualifiées d'expertes. En effet, pour un certain nombre de points comme par exemple, l'effet de techniques alternatives sur les bioagresseurs telluriques, les connaissances scientifiques sont encore lacunaires. Dans une telle situation, les conseillers peuvent être considérés comme des experts car ils détiennent des connaissances sur les systèmes de culture et les techniques alternatives pouvant compléter les connaissances scientifiques et parfois combler les lacunes scientifiques. Ces connaissances expertes ne sont pas toujours formalisées de manière générique.

Ensuite, la confrontation d'un premier arbre d'évaluation théorique à l'avis de conseillers techniques a permis également d'affiner la structure de l'arbre et de l'adapter au cas spécifique du maraîchage sous abri en Provence. Le choix de consulter des conseillers techniques présents sur une zone géographique limitée, se justifie par le fait que les connaissances que nous devons extraire de l'expérience des conseillers afin de les intégrer à la structure de l'arbre, devaient concerner spécifiquement les systèmes maraichers sous abri froids provençaux. La contrepartie de ce choix est la faible divergence des informations apportées d'un conseiller à l'autre. En effet, les avis des conseillers sur la structure ont été relativement convergents. La convergence des avis de conseillers peut aussi s'expliquer par le fait que les conseillers techniques sollicités travaillent sur un territoire commun assez restreint. Ces conseillers sont certainement confrontés à des situations professionnelles similaires et leurs expériences d'observations de systèmes de culture chez les producteurs peuvent être parfois proches. De plus, ces derniers sont régulièrement amenés à collaborer au travers de projets ou à se côtoyer dans le cadre de réunions, de journées de formations. Les réunions professionnelles au sein desquelles les conseillers se retrouvent comme celles organisées par exemple pour le projet de co-conception de l'unité d'Ecodéveloppement de l'INRA d'Avignon favorisent les échanges, le partage des connaissances et au final peuvent permettre de créer une vision commune notamment sur la gestion des bioagresseurs telluriques par les systèmes de culture et les techniques alternatives émergentes.

De plus, il faut préciser que d'un point de vue pratique, le fait de consulter des conseillers déjà investis dans le projet de co-conception de systèmes de culture innovants et sensibilisés à l'utilisation d'un outil d'évaluation dans cette démarche, a facilité le travail de confrontation de l'arbre d'évaluation à l'avis d'expert.

Le nombre de conseiller consulté s'est limité à cinq, car au bout du cinquième entretien, nous avons considéré que la réalisation d'entretien supplémentaire n'apporterait pas de modifications étant donnée que les avis des conseillers consultés précédemment se recoupaient et étaient assez homogènes.

Au-delà de l'intérêt de consulter des conseillers techniques pour qu'ils apportent des connaissances complétant les connaissances scientifiques, il est aussi intéressant d'avoir intégré des conseillers techniques dans le processus d'élaboration d'un modèle d'évaluation auquel ils seront confrontés lors de réunion de conception des systèmes de culture innovants. Cette démarche mise en oeuvre pour élaborer un modèle rejoint le concept de modélisation participative évoqué par Thornton et Herrero (2001). Une telle démarche favorise l'adoption du modèle par les acteurs de « terrain », ce qui est bénéfique pour une future utilisation de l'outil en réunion avec les conseillers.

La sollicitation des conseillers techniques durant la phase de construction de l'outil a donc eu un double intérêt positif, elle a permis d'une part la prise en compte et l'introduction de connaissances expertes dans la structure du modèle. D'autre part, elle a favorisé la compréhension par les conseillers de la structure de base du modèle d'évaluation et de la manière dont se construisent les évaluations finales. Le risque par contre est de voir ces mêmes conseillers adopter une position peu critique vis-à-vis des évaluations réalisées par l'outil dans les phases ultérieures de validation puisque leurs connaissances sont désormais mobilisées dans cet outil ; cela ne semble pas avoir été le cas au regard des remises en cause effectuées.

1.2) Critique de la méthode de validation de l'outil par les données de terrain

Une méthode basée sur la confrontation des sorties du modèle d'évaluation avec des données issues d'observations en parcelle de producteurs a été développée pour tenter de valider le modèle d'évaluation et ses sorties. Pour cela une hypothèse de départ sur laquelle s'est appuyée la méthode a été formulée. Cette hypothèse part du principe que les évaluations des systèmes de culture proposées par le modèle doivent être en correspondance avec les niveaux d'infestation de ces mêmes systèmes de culture, niveaux déterminés à partir de données d'observation, pour pouvoir affirmer que ces évaluations sont émises par le modèle en accord avec la réalité. C'est-à-dire qu'un système de culture dont le niveau d'infestation en bioagresseurs est défini comme faible doit être évalué comme bon par le modèle, un système au niveau d'infestation modéré en bioagresseurs doit être évalué comme acceptable et un système au niveau d'infestation élevé en bioagresseurs doit être évalué comme mauvais. Cette méthode proposée n'a pas permis d'assurer la validation du modèle d'évaluation car le nombre de correspondances obtenues entre évaluations et niveaux d'infestation en bioagresseurs des systèmes de culture n'a pas été suffisant pour affirmer que les sorties du modèles sont émises en cohérence avec le système réel étudié.

En observant le Tableau 3, on peut tout de même constater que les concordances sont meilleures pour les systèmes qui sont très faibles, faibles et modérées que pour les systèmes où l'infestation est forte. Pour les premiers, 9 systèmes sur 17 sont correctement classés et aucun des 17 n'est classé comme mauvais. Pour les systèmes à forte infestation par contre, l'évaluation peut prendre toutes les valeurs (mauvais, acceptable ou bon) et seulement 3 sur 11 sont bien classés en mauvais, autant d'ailleurs que ceux classés en bon.

La méthode utilisée s'appuie sur une hypothèse de départ qui base la validation des sorties du modèle sur la correspondance entre les évaluations de la qualité sanitaire des systèmes de culture issues du modèle et leurs niveaux d'infestation. Cette hypothèse doit cependant être discutée. Les échelles temporelles de l'évaluation de la qualité sanitaire et des niveaux d'infestation ne correspondent pas entre elles.

Les niveaux d'infestation en bioagresseurs ont été déterminés à partir de données d'observation des systèmes de culture collectées sur une période de deux ans. Ces niveaux d'infestation sont donc représentatifs de potentiels infectieux en bioagresseurs telluriques présents dans les tunnels sur une période de deux ans. La qualité sanitaire des systèmes de culture évaluée par le modèle correspond à une capacité des systèmes de culture à gérer les bioagresseurs à long terme donc sur une période beaucoup plus longue que simplement deux ans.

Par exemple, un système de culture peut très bien être évalué comme ayant une bonne qualité sanitaire par le modèle et présenter un niveau d'infestation en bioagresseurs modéré ou élevé les deux années durant lesquelles il a été mis en place. Cela ne signifie pas forcément que l'évaluation proposée par le modèle est faussée. Si le système est vraiment bon au niveau de la gestion des bioagresseurs telluriques et qu'il a été mis en place sur une parcelle très infestée en bioagresseurs, au bout d'une période plus longue que simplement deux ans ce système peut permettre la réduction de l'inoculum en bioagresseurs présents dans le sol de la parcelle.

Il est même tout à fait concevable que soit mis préférentiellement en place sur des parcelles très infestées des systèmes conçus pour lutter contre ces infestations, systèmes qui seront à juste titre évalués comme bons par le modèle multicritère. Cela peut peut-être expliquer la présence de trois systèmes jugés bon et 5 jugés acceptables sur les 11 tunnels très infestés et de seulement 3 systèmes jugés mauvais : les agriculteurs adaptent leurs systèmes et les objectifs qu'ils leur assignent à l'état sanitaire de leurs tunnels.

La correspondance entre l'évaluation de la qualité sanitaire d'un système de culture obtenue avec le modèle et le niveau d'infestation en bioagresseurs du système de culture aurait pris du sens si ce niveau d'infestation avait été défini à partir de suivis des infestations en bioagresseurs réalisés durant une période plus longue que deux saisons culturales et commençant au moment de la mise en place du système de culture.

La méthode développée pour essayer de valider les sorties du modèle à partir de données de terrain n'a pas bien fonctionné mais celle-ci ouvre des pistes intéressantes en matière de méthode de validation alternative d'un modèle d'évaluation multicritère et qualitatif. Cette démarche de validation essaie de se rapprocher des démarches classiques de validation de modèle basées sur des méthodes statistiques, dans le sens où elle évalue la cohérence entre les sorties qualitatives du modèle et des données qualitatives issues de la réalité.

1.3) Discussion sur la validation par le groupe d'experts

La réunion organisée avec le groupe de conseillers techniques participant au projet de co-conception a conduit à la validation de façon informelle des sorties du modèle d'évaluation mis au point. Dans cette situation, l'outil d'évaluation a été utilisé pour réaliser des évaluations *a posteriori* de systèmes de culture existants et bien connus des conseillers techniques. Cette forme

de validation correspond à ce que l'on pourrait appeler une validation à « dire d'experts », qui est une forme de validation couramment utilisée pour valider des modèles aux sorties quantitatives. L'expertise des conseillers techniques et leurs connaissances des systèmes de culture maraichers sous abri en conditions réelles ont été mobilisées pour valider les représentations du modèle d'évaluation. Dans cette situation, les conseillers sont de nouveau dans une position d'experts puisqu'ils disposent d'une connaissance poussée des systèmes de culture qui leur permet de juger de la cohérence des simulations du modèle avec la réalité.

Cependant, il faut noter que seules les quelques évaluations de systèmes de culture réalisées avec l'outil et présentées lors de la réunion, ont été validées par les conseillers. De nombreuses possibilités de systèmes de culture n'ont pas été évaluées avec le modèle, ce qui signifie que la sensibilité du modèle n'a pas été complètement testée. On ne peut pas considérer que la validation d'un tel outil est totale et définitive. Ce type de modèle d'évaluation multicritère et qualitatif contient dans sa structure des parties encore hypothétiques, ou basées sur des connaissances en cours de stabilisation (comme c'est le cas pour la biofumigation discutée plus haut) qui ne peuvent pas encore être réellement validées. La répétition d'un processus de confrontation d'évaluations *a posteriori* de systèmes de culture à l'avis d'experts peut permettre d'améliorer progressivement la sensibilité de l'outil d'évaluation. En effet, les itérations du processus de validation amènent à la transformation de parties hypothétiques de l'outil en des savoirs stabilisés. Cette forme de validation utilisée peut être qualifiée de « validation par l'usage » (ComMod, 2005), dans ce cas l'utilisation du modèle facilite la validation de celui-ci mais la validation n'est que partielle. Bien que partielle au sens classique, c'est-à-dire que la confrontation à une réalité mesurée n'a pas été à proprement parler réalisée, elle peut cependant être considérée comme suffisante dans la mesure où le collectif utilisant ce modèle d'évaluation considère qu'il a atteint son objectif.

1.4) L'utilisation de la complémentarité des sources de connaissances pour construire et valider le modèle d'évaluation

Les phases de construction et de validation du modèle d'évaluation se sont toutes deux basées sur la complémentarité de sources de connaissances diverses. La phase de construction du modèle s'est faite en mobilisant à la fois des connaissances issues de la littérature scientifique et des connaissances plus subjectives provenant de l'expertise de conseillers techniques. Ces connaissances diverses ont été complémentaires puisque les lacunes des connaissances scientifiques ont pu parfois être comblées par des connaissances issues de la réalité du terrain.

Les connaissances non formalisées dans la littérature détenues par les conseillers ne sont pas toutes aussi précises ou stables les unes que les autres. Certaines de ces connaissances résultent de plusieurs années d'expérience et d'observation par les conseillers, dans ce cas peuvent donc être considérées comme fiables. D'autres connaissances apportées par les conseillers sont plus partielles en raison du manque de recul des conseillers sur ces dernières. Elles concernent par exemple certaines techniques alternatives de gestion des bioagresseurs récemment développées, sur lesquelles les connaissances scientifiques et les connaissances de l'observation de ces techniques en conditions réelles sont encore peu fournies. Ces connaissances mêmes partielles doivent être prises en compte afin de donner la capacité à l'outil d'évaluation d'avoir une vision

d'ensemble du système étudié la plus complète. Les connaissances partielles intégrées à l'outil pourront être complétées et stabilisées au fil du temps avec l'apport de nouvelles connaissances scientifiques ou empiriques.

En ce qui concerne la phase de validation, des connaissances de nature différentes mais témoignant de la réalité du terrain ont été utilisées pour être confrontées aux sorties du modèle. L'utilisation de données collectées sur le terrain et des avis des conseillers techniques permettent l'apport de connaissances complémentaires qui renforcent le processus de validation consistant à vérifier la cohérence entre les sorties du modèle et ces connaissances représentant le système réel que l'on cherche à évaluer.

Les connaissances scientifiques, les connaissances des acteurs de terrain et les données d'observation obtenues en conditions réelles sont autant de connaissances qui utilisées de façon complémentaires permettent de mettre au point un modèle d'évaluation multicritère et qualitatif le plus cohérent possible avec la réalité.

II) Les perspectives d'utilisation de l'outil d'évaluation des systèmes de culture mis en place

II.1) L'outil d'évaluation facilite la démarche de co-conception de système de culture innovants

Cet outil d'évaluation multicritère a été spécifiquement mis en place pour servir à l'évaluation *a priori* de prototypes de systèmes de culture innovants combinant de pratiques alternatives de gestion des bioagresseurs telluriques. Le modèle d'évaluation peut aussi permettre de réaliser des évaluations *a posteriori* des systèmes de culture mais ce n'est pas l'utilisation principale attendue de ce modèle dans le cadre de la démarche de co-conception de systèmes de culture innovants. Cet outil de recherche facilite la démarche participative de co-conception avec un groupe de conseillers techniques.

Tout d'abord, l'outil d'évaluation permet de faire de la prospection sur les systèmes de culture en maraîchage sous abri intéressants du point de vue de la gestion des bioagresseurs telluriques. L'outil en évaluant les propriétés à long terme des systèmes de culture facilite l'identification de systèmes de culture les plus intéressants. Les évaluations obtenues à partir du modèle ne doivent pas être considérées comme sans faille car étant donné que l'outil cherche à donner une vision vers le futur, des parties de sa structure sont hypothétiques. Les évaluations du modèle correspondent plutôt à des pistes de réflexion servant de support aux discussions entre les différents acteurs de la réunion de co-conception. Ces évaluations permettent aussi d'identifier les points sensibles du système de culture qui peuvent être améliorés, ce qui facilite la conception de systèmes de culture de plus en plus prometteurs pour gérer les bioagresseurs.

Ce modèle d'évaluation est véritablement un outil de recherche ayant pour but d'être utilisé par les chercheurs comme un outil d'animation et de support à la réflexion dans le cadre de réunions de conception de systèmes de culture innovants avec les conseillers techniques.

Les sorties de l'outil permettront d'orienter les discussions entre acteurs de la réunion et de faire le tri pour ne garder que les alternatives de système de culture qui semblent intéressantes sur le plan de la gestion des bioagresseurs telluriques. Les discussions autour des alternatives de

système de culture sélectionnées à partir des évaluations du modèle ouvriront des pistes pour l'expérimentation de systèmes de culture innovants en conditions réelles.

Ensuite, le modèle d'évaluation présente l'avantage de permettre de porter un jugement de manière objective sur la qualité sanitaire de différents systèmes de culture. Par exemple, pour un système de culture donné, le résultat de l'évaluation du système de culture par l'outil sera toujours le même quelque soit le nombre de fois où l'évaluation est répétée. Alors que dans le cas où le jugement de la qualité sanitaire d'un système de culture était porté par les différents conseillers, suivant le conseiller, le résultat de ce jugement serait certainement différent car soumis à la subjectivité de chacun ainsi qu'à l'évolution de ses expériences, de ses connaissances. Enfin, ce modèle d'évaluation présente l'avantage d'être évolutif. En fait, la construction de ce modèle d'évaluation n'est jamais réellement terminée, c'est-à-dire que des connaissances nouvelles sur la gestion des bioagresseurs telluriques peuvent être intégrées à la structure du modèle au fil du temps. Par exemple, si une nouvelle technique alternative permettant de gérer les bioagresseurs telluriques apparaît, celle-ci peut être intégrée dans la structure du modèle à partir du moment où il existe des connaissances soit issues de littérature scientifique, soit issues des conseillers techniques. Une nouvelle technique pour laquelle aucune connaissances ne seraient encore disponibles ne pourrait en revanche pas être intégrée dans la structure du modèle.

Le fait que la structure de l'outil d'évaluation puisse évoluer au cours du temps en fonction de l'apport de connaissances nouvelles est une propriété nécessaire pour un outil permettant de faire de la prospection sur des systèmes de culture innovants. On peut considérer que cet outil d'évaluation ne sera jamais stabilisé et ni sa structure fixée tant que son utilisation première sera la prospection sur les systèmes de culture.

II.2) D'autres utilisations possibles

Cet outil permet aussi l'évaluation *a posteriori* de système de culture comme celles qui ont été réalisés dans la phase de validation de l'outil. On peut imaginer qu'en stabilisant l'ensemble des connaissances contenues dans la structure de l'outil et en affinant au maximum sa sensibilité, cet outil d'évaluation puisse être utilisé par des conseillers lors de réunion avec les agriculteurs comme outil d'animation et de sensibilisation aux pratiques alternatives de gestion des bioagresseurs telluriques. C'est une des perspectives envisagée par un conseiller lors de la réunion de validation.

Ensuite, l'outil d'évaluation présente l'avantage d'organiser l'ensemble des connaissances actuelles sur la gestion des bioagresseurs telluriques en arbre hiérarchique donnant une vision d'ensemble sur le problème complexe de la gestion des bioagresseurs telluriques en maraichage sous abris. Cette structure sous forme d'arbre pourrait être utilisée comme outil pédagogique pour former de jeunes conseillers techniques ou autres.

Conclusion

Ce travail a conduit à la construction et la validation d'un outil d'évaluation multicritère des systèmes de culture maraîchers sous abri froid vis-à-vis de la gestion de plusieurs bioagresseurs telluriques. La mise au point d'un tel outil s'est faite en mobilisant à la fois des connaissances scientifiques, des connaissances de terrain provenant de l'expérience de conseillers techniques et des données d'observation recueillies en conditions réelles.

L'utilisation de la complémentarité de connaissances scientifiques issues de la littérature scientifique et de connaissances expertes provenant de conseillers techniques a favorisé, d'une part, un enrichissement de la structure du modèle d'évaluation et, d'autre part, une adaptation du modèle aux spécificités des systèmes maraîchers provençaux. Les connaissances scientifiques plutôt génériques ayant servies à la construction de la structure de base du modèle, ont été soit complétées, soit précisées et adaptées par des connaissances plus empiriques issues d'observation des systèmes de culture en conditions réelles.

La méthode de validation originale mise en œuvre s'est articulée en deux étapes principales ; une première étape a consisté à vérifier la cohérence des sorties du modèle en les confrontant à des données d'observation témoignant de la réalité du terrain. Cette première étape de la démarche de validation, se rapprochant dans la manière de procéder d'une méthode de validation classique de modèle, n'a pas permis l'affirmation de la validité des sorties du modèle. En revanche, celle-ci ouvre des pistes de réflexion en matière de méthode de validation de modèles multicritères et qualitatifs pour lesquels il n'existe pas de méthodes standardisées à l'heure actuelle.

La deuxième étape de la validation visait à confronter les sorties du modèle d'évaluation multicritère à l'avis d'experts. Cette confrontation a conduit à une forme de validation que l'on peut qualifier de « validation par l'usage ». Le modèle d'évaluation multicritère créé a donc été validé par confrontation des sorties du modèle à l'expertise des conseillers. Cette validation par l'usage doit être considérée comme un processus continu se poursuivant à chaque usage des modèles avec des experts ou conseillers expérimentateurs.

En effet, la structure du modèle créé ne sera jamais stabilisée tant que le modèle sera utilisé pour évaluer les systèmes *a priori*. L'apparition de nouvelles connaissances scientifiques ou expertes sur la gestion des bioagresseurs telluriques entraînera nécessairement des modifications dans la structure de l'outil.

Cette évolutivité en fait un outil adapté à l'accompagnement des processus d'innovation

Cet outil permettant la prospection sur des systèmes de cultures innovants en maraîchage sous abri est utilisé dans le cadre d'une démarche de co-conception. Il sera employé comme outil de support à la réflexion et à la discussion sur des prototypes de systèmes de culture innovants. Il permettra la mise en évidence des alternatives les plus intéressantes pour gérer les nématodes à galle et les champignons du collet dans les abris. L'utilisation de l'outil d'évaluation conduira à la mise en évidence de perspectives d'expérimentation de systèmes de culture innovants en conditions réelles. La décision d'expérimenter les prototypes de systèmes de culture les plus intéressants pourra alors être prise par le groupe de co-conception.

Bibliographie

- Abawi G, Widmer T, 2000. Impact of soil health management practices on soilborne pathogens, nematodes and root diseases of vegetable crops. *Applied Soil Ecology*, 15: 37-47.
- Agreste Provence-Alpes-Côte d'Azur, 2008. Portrait Agricole : les Bouches-du-Rhône. Etude n°34. 7p.
- Agreste Provence-Alpes-Côte d'Azur. 2009. Portrait Agricole : le Vaucluse. Etude n°45.8p.
- Ben-Mena S., 2000. Introduction aux méthodes multicritères d'aides à la décision. Disponible sur : <http://www.pressesagro.be/base/text/v4n2/83.pdf> [Consulté 12 avril, 2011].
- Bertrand C, 2001. Lutter contre les nématodes à galles en Agriculture Biologique. *Fichetechnique GRAB/ITAB*, 4p.
- Bertrand, C., Lizot, J-F., 2001; Les tourteaux végétaux pour lutter contre les nematodes à galle en Agriculture biologique. *Alter Agri*, 45 : 22-23
- Blancard D, Lot H, Maisonneuve B, 2003. *Maladies des salades : Identifier, connaitre et maitriser*. INRA, Paris, 375
- Bohanec, M, 2007. *DEXi: Program for Multi-Attribute Decision Making, User's Manual, Version 2.00*. IJS Report DP-9596, Jožef Stefan Institute, Ljubljana.
- Bohanec, M., Rajkovic, V., 1990. DEX: An expert system shell for decision support. *Sistemica*, 1(1), p.145-157.
- Boland G.J., Hall R. (1994). Index of plant hosts of *Sclerotinia sclerotiorum*. *Canadian Journal of Plant Pathology*. 16(2) : 93-108.
- Bonanomi G, Antignani V, Pane C, Scala F, 2007. Suppression of soilborne fungal diseases with organic amendments. *J Plant Pathol*, 89(3): 311-324.
- Cayrol J.C. (1971). Rôle des nématodes dans l'équilibre biologique des sols ; influence des traitements nématicides. *In* : Ritter M. (Eds). *Les nématodes des cultures*. Editions ACTA. Paris, France. 67-142.
- Chambre d'agriculture du Vaucluse, septembre 2008. Diagnostic de l'agriculture et des pratiques agricoles de la zone vulnérable « Comtat-Ventoux ».
- Collange, B., 2011. Vers une Gestion Agronomique des Bioagresseurs Telluriques en Maraîchage sous Abri: Evaluation de Systèmes de Culture. Thèse de Doctorat en Sciences de la vie et de la Santé, Université de la Méditerranée Aix Marseille II. 264p.
- ComMod, « La modélisation comme outil d'accompagnement », *Natures Sciences Sociétés* 13, no. 2 (2005): 165-168.
- De Guiran G, 1993. Protection des cultures maraîchères et fruitières face aux capacités d'adaptation des nématodes *Meloidogyne*. *C.R Acad. Agric. Fr*: 71-78

Department for Communities and Local Government, 2009. Multi-criteria analysis: a manual. Disponibles sur : <http://www.communities.gov.uk/publications/corporate/multicriteriaanalysis> manual [Consulté avril 22, 2011].

Dijan-Caporalino, C., 2010. Nématodes à galles, des ravageurs de plus en plus préoccupants: Résultats de trois ans d'enquête dans quinze régions françaises. *Phytoma, la défense des végétaux*, (638), p.43–49.

Djian-Caporalino C, Védie H, Arrufat A, 2009. Gestion des nématodes à galles: Lutte conventionnelle et lutes alternatives. L'atout des plantes pièges. *Phytoma, la défense des végétaux* 19, 18p.

Elad Y, Malathrakis NE, Dik AJ, 1996. Biological control of Botrytis-incited diseases and powdery mildews in greenhouse crops. *Crop Prot*, 15: 229-240.

Garibaldi, Gullino ML, Minuto G, 1997. Diseases of basil and their management, *Plant disease* 81(2): 124-132

GRAB et APREL, 2011. La solarisation en maraîchage. 4p

Gros, P., 2000. Utilisation du modèle linéaire. Rappels de base-méthodes de validation. Disponible sur : <http://archimer.ifremer.fr/doc/00013/12405/9191.pdf> [Consulté le 6 mai, 2011]

Keeney R., 1992. Value-Focused Thinking: A Path to Creative Decision Making. Harvard University Press, 412p.

Laemmlen F, 2001. *Sclerotinia* disease. *University of California, agriculture and natural resources. ANR publication 8042*, 5p

Loyce, C.; Rellier, J.-P. & Meynard, J.-M. Management planning for winter wheat with multiple objectives (1): the BETHA system *Agric. Syst.*, 2002, 72, 9-31

Litterick AM, Harrier L, Wallace P, Watson CA, Wood M, 2004. The Role of Uncomposted Materials, Composts, Manures, and Composts Extracts in Reducing Pest and Disease Incidence and Severity in Sustainable Temperate Agricultural and Horticultural Crop Production-A Review. *Crit Rev Plant Sc*, 23(6): 453-479.

Marcus, A.H. et Elias, R.W., 1998. Some useful statistical methods for model validation. *Environmental Health Perspectives*, 106(Suppl 6), p.1541-1550.

Melzer M.S., Smith E.A., Boland G.J. (1997). Index of plant hosts of *Sclerotinia minor*. *Canadian Journal of Plant Pathology*. 19(3) : 272 – 280.

Munda, G., 2003. Multicriteria Assessment, International Society for Ecological Economics, Internet Encyclopedia of Ecological Economics. Disponible sur: <http://www.ecoeco.org/pdf/mlticritassess.pdf> [Consulté le 20 avril, 2011]

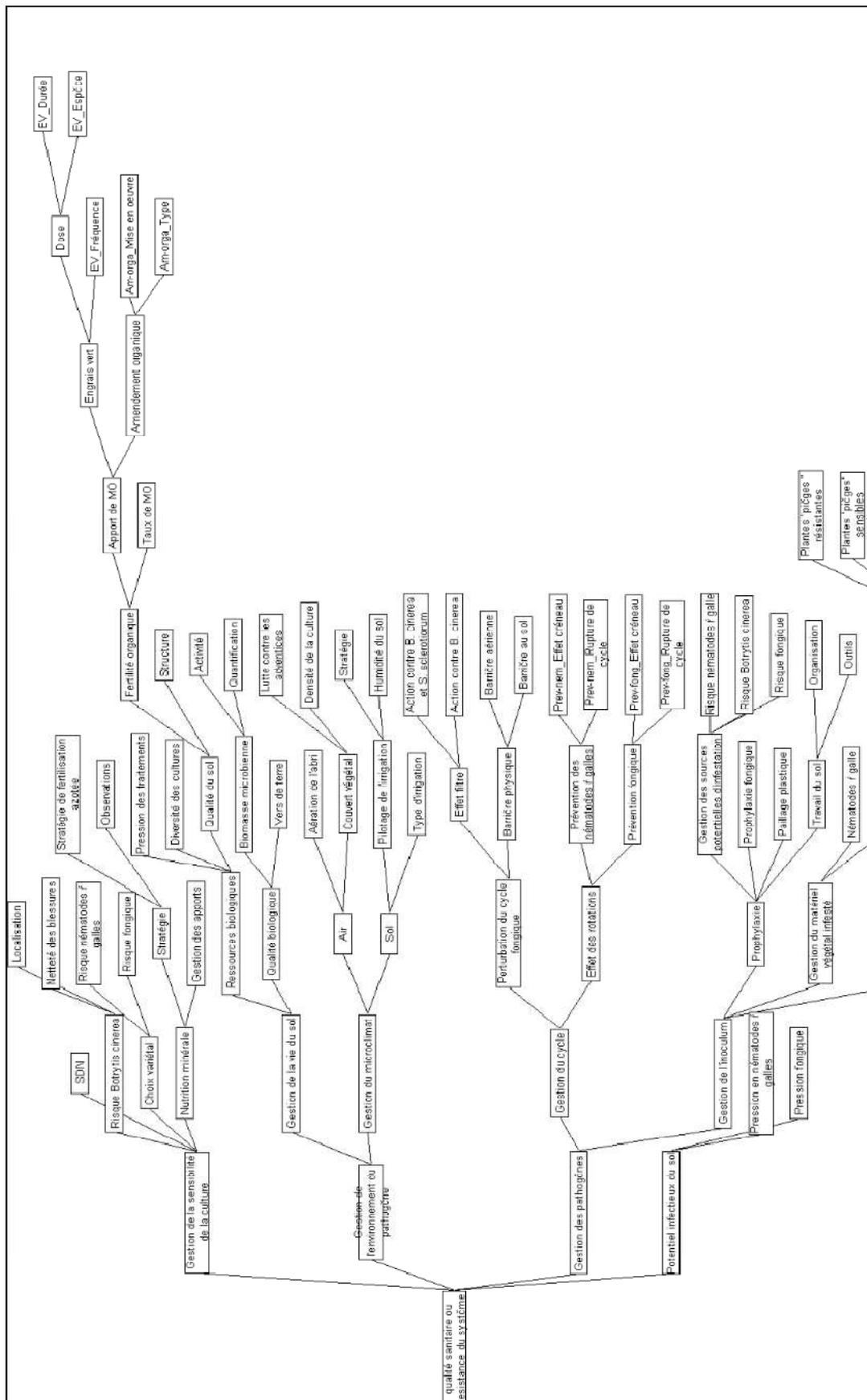
Navarrete M., Tchamitchian M., Aissa-Madani C., Collange B., Taussig C., 2010. Elaborating innovative solutions with experts using a multicriteria evaluation tool The case of soilborne disease control in market-gardening cropping systems, International symposium .Innovation and Sustainable Development in Agriculture and Food. Montpellier, France. June

- Pavé, Alain, 2005. Commentaire - La modélisation et la simulation des objets et processus complexes. Questions scientifiques, méthodologiques et éthiques. *Natures Sciences Sociétés*, 13(2), p.3.
- Pappas AC, 2000. Epidemiology and control of *Botrytis cinerea* in tomato crops grown under cover in Greece. *Bulletin OEPP/EPPO*, 30: 269-274.
- Peyre G, 2007. Systèmes de culture et gestion des nématodes en cultures maraîchères sous abri: Diagnostic en parcelles d'agriculteurs. Stage de fin d'étude d'ingénieur, ENITA, Clermont Ferrand, 44p.
- Philips A.J.L. (1990). The effects of soil solarisation on sclerotial populations of *Sclerotinia sclerotiorum*. *Plant Pathology*. 39 : 38-43.
- Regnault-Roger, C., Fabres, G., Philogene, B.J.R., 2005. Enjeux phytosanitaires pour l'agriculture et l'environnement. Lavoisier, Paris
- Sebillotte M. (1990). Système de culture, un concept opératoire pour les agronomes. In : Combe L., Picard C. (Eds). Un point sur...les systèmes de culture. Editions INRA. Paris, France.165-196.
- Tchamitchian, M.; Martin-Clouaire, R.; Lagier, J.; Jeannequin, B. & Mercier, S. Serriste: A daily set point determination software for glasshouse tomato production *Comput. Electron. Agric.*, 2006, 50, 25-47
- Thornton P.K., Herrero M., 2001. Integrated crop-livestock simulation models for scenario analysis and impact assessment, *Agric. Syst.* 70, 581-602
- Viaene N, Abawi G, 1998. management of *Meloidogyne hapla* on lettuce in organic soil with sudangrass as a cover crop. *Plant disease*. 82 (8). 945-952.
- Villeneuve F, Brunel E, Lagrue C, Poissonier J, Rouxel F, Thicoïpe JP, Trottin-Caudal Y, 1999. Légumes de plein champ – *Protection phytosanitaire respectueuse de l'environnement*. CTIFL éditions, Paris, France, 191p.
- Zeck W.M., 1971. A rating scheme for field evaluation of root-knot infestations. *Pflanzenschutz Nachrichten Bayer AG*. 24 : 141–144.

Tables des Annexes

Annexe 1: Structure de l'arbre d'évaluation avant enquêtes avec les conseillers	1
Annexe 2: Exemple de trame d'entretien	3
Annexe 3: Echelle de Zeck permettant la détermination des indices de galle	7
Annexe4: Tableau des sévérités conditionnelles	8
Annexe 5 : Script pour générer la distribution « expérimentale » de l'indice de concordance global	9
Annexe 6 : Structure de l'arbre d'évaluation après enquêtes avec les conseillers	10

Annexe1 : Structure de l'arbre d'évaluation avant enquêtes avec les conseiller



Annexe 2 : Exemple de trame d'entretien

Construction de la structure de l'arbre à dire d'experts

Nom de l'expert :

Date d'entretien :

Travaille au sein de :

BRANCHE 1 « Gestion des pathogènes »

Pour la branche « Gestion des pathogènes » → « Gestion de l'inoculum » →
« Action létale sur l'inoculum »

« Techniques létales »

-Pour la solarisation prise en compte de la durée, des conditions d'installation et des conditions de préparation du sol ?

-Pour désinfection vapeur, importance du travail du sol et de la structure du sol pour l'efficacité. D'autres éléments à prendre en compte ?

- Pour la biodésinfection, quel délai entre apport d'un amendement et bâchage suivant que l'on utilise un engrais vert biocide (libérant des composés biocides volatils) ? ou un compost, un fumier... ?

-Pour la biodésinfection, dose à apporter selon le type/espèce d'amendements organiques utilisés ? (voir le tableau « Biodésinfection »). Si amendements organiques de type fumier, compost quelle dose apportée ?

- Pour les amendements biocides, quelles sont les doses minimales d'amendements biocides (engrais vert + tourteaux) ayant un effet sur les différents bioagresseurs ? (voir le tableau « Amendements biocides »).

-Si on devait les classer par efficacité ? sur les différents bioagresseurs ?

-différents traitements chimiques du sol encore utilisés ? D'Orlone (1,3 dichloropropène) ?

-efficacité des traitements chimiques sur les différents bioagresseurs ? Combien de passages ?

-Combinaisons de plusieurs techniques de lutte et effets sur les différents bioagresseurs telluriques ?

- ⇒ combinaison de traitements chimiques et d'une technique alternative
- ⇒ combinaison de plusieurs techniques alternatives

⇒

(ex : deux techniques alternatives ayant un effet moyen sur les bioagresseurs telluriques peuvent en étant combinées avoir un effet fort).

« **Reprise de labour** » correspond à travail du sol après la réalisation d'une technique.

-Est-ce que le non travail du sol ou le travail à des faibles profondeurs après la réalisation d'une technique de lutte est primordial ?

« **Fréquence** »

-les modalités des fréquences pour chacune des techniques sont les même : « chaque année = intense » ; « un an sur deux= acceptable » et « moins d'un an sur trois = insuffisant »

Qu'en pensez-vous, certaines techniques pourraient-elles être considérées comme « intense » à des fréquences plus faibles ?

Effets des différentes techniques alternatives ?

Solarisation	Désinfection vapeur	Bio désinfection	Tourteau biocide	Engrais vert	cultures pièges
N /	N+	N+	N+	N/	N+
C+	C+	C+	C-	C/	C-

effet de réduction de la population de nématodes: N+

pas effet de réduction de la population de nématodes: N -

effet de réduction de la population de champignons: C+

pas effet de réduction de la population de champignons: C -

effet variant : /

Pour la branche « Gestion des pathogènes » → « Gestion de l'inoculum » → « Gestion du matériel infesté »

-« Gestion du matériel infesté » Est-ce que le retrait des plants infestés est une pratique courante et efficace pour gérer les pathogènes ?

Pour la branche « Gestion des pathogènes » → « Gestion de l'inoculum » → « Prophylaxie »

-Effet de l'organisation du travail du sol sur la gestion des bioagresseurs ? Parcelles saines travaillées avant parcelles à risque et nettoyage des outils.

-paillage plastique changé entre deux cultures, effet important de cette pratique de prophylaxie ?

-« Prophylaxie fongique » correspond à l'orientation des rangs dans le tunnel dans le sens des vents dominants. Est ce vraiment important dans un tunnel ?

→ Branche « Gestion des pathogènes » → « Gestion de l'inoculum »

-Actuellement, les poids pour « Action létale sur l'inoculum », « Gestion du matériel Infesté » et « Prophylaxie » sont respectivement les suivants : 41, 10 et 49.

Quelle est l'importance de la prophylaxie par rapport à la réalisation d'une action létale ?

Pour la branche « Gestion des pathogènes » → « Gestion du cycle » → « Effet des rotations »

- effet rupture de cycle pour les nématodes ? quelles plantes peuvent créer cette rupture (liste des plantes non hôtes ou peu hôtes) ?

-effet de rupture pour les champignons ?

- « perturbation du cycle » → le paillage comme barrière physique au sol ?

Et « barrière aérienne » avec utilisation des filets sur les ouvrants ? Ces filets sont ils efficaces ? Permettent-ils toujours une bonne aération ?

-Effet de la coloration des bâches couvrant les tunnels, leur coloration bloque les UV ce qui défavorise Sclerotinia et Botrytis (blocage de la sporulation)? Utilisation dans la réalité ?

BRANCHE 2 : « Gestion de l'environnement du pathogène »

Pour la branche « Gestion de l'environnement du pathogène » → « Gestion du microclimat».

-« Sol » correspond à la gestion du risque de dissémination fongique et de nématodes à galles dans le sol

Effet de dissémination fongique par le type d'irrigation, l'aspersion favorise la dispersion alors que le goutte à goutte non ?

Sols régulièrement humides sont plus propices au développement de maladies ?

-pour « Air » l'aération de l'abri défavorise les bioagresseurs ? L'effet est le même pour chacun des bioagresseurs ?

Pour la branche « Gestion de l'environnement du pathogène » → « Gestion de la vie du sol ».

-« la qualité biologique du sol » définie par la présence de vers de terre et la biomasse microbienne. Est-ce que des sols présentant une bonne activité biologique sont moins sensibles aux bioagresseurs ? Gestion par des bioagresseurs par les antagonistes ?

-« Les ressources biologiques du sol » dont l'évolution dépend de la « qualité du sol », de la « diversité des cultures » et « de la « pression des traitements ».

Pour « la pression des traitements », les techniques de solarisation, de bio désinfection... crée un vide biologique, effet contradictoire avec la mise en place d'une activité antagoniste des micro organismes dans le sol.

Dans « qualité biologique », pour taux de MO, qu'elle est la teneur acceptable en MO pour les sols de la région ? 2 à 3 % ?

Pour « apport » de MO, Quels sont les amendements organiques pratiqués par les agriculteurs ? les doses conseillées ?

BRANCHE 3 : « Gestion de la sensibilité de la culture »

« Gestion de la sensibilité de la culture » → « Nutrition minérale »

Apports à long terme par amendements organiques plus favorables que des apports à court terme (engrais minéraux) directement disponibles pour la plante et les microorganismes ?

Contradiction entre le fait qu'une plante bien nourrie est moins sensible aux maladies et le fait que la fertilisation azotée favorise aussi le développement des pathogènes.

« Gestion de la sensibilité de la culture » → « Choix variétal »

L'importance du choix variétal pour gérer le risque d'infestation, pour gérer les maladies fongiques, importance du port de la plante ?

Pour les nématodes, importance du choix du porte greffes ou des variétés ?

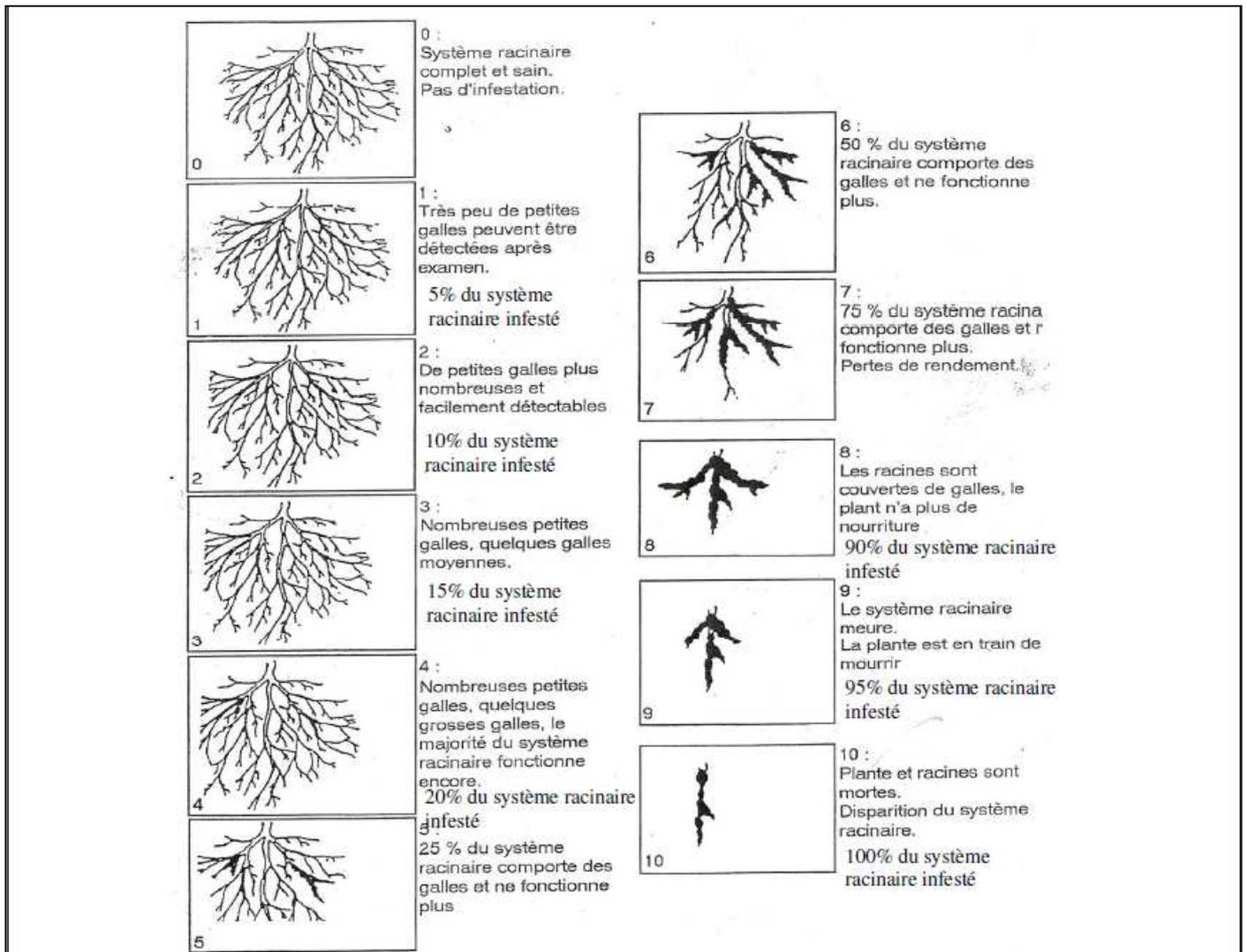
« Gestion de la sensibilité de la culture » → « Risque Botrytis »

Importance de la technique d'effeuillage pour limiter l'infestation en Botrytis ?

« Gestion de la sensibilité de la culture » → « SDN »

Utilisation des SDN

Annexe 3 : Echelle de Zeck permettant la détermination des indices de galle



Annexe 4 : Tableau des sévérités conditionnelles

	melon IG 2007	melon IG 2008	salade1 IG 2008	salade1 %I 2008	salade2 %I 2008	salade3 IG 2008	salade3 %I 2008	melon IG 2009	salades 1 IG 2009	salade1 %I 2009	salade2 IG 2009	salade2 %I 2009
Bo3			0	0,186	0,047	0	0,063		0	0,384		0,195
Bo8			0	0,142	0,050				0	0,175		0,19
Bo19			0,096	0,426	0,542	0			0	0,196		0,227
Ca1	0,025	0,025	0,121	0,133	0,057			0,017	0,163	0,014		0,038
Ca2	0	0,081	0,063	0,167	0,000			0,049	0,058	0		0
Ca3	0,211	0,275	0,263	0,043	0,029			0,261	0,038	0,057		0
Ca4	0,064	0,056	0,042	0,015	0,000			0,024	0,023	0		0,088
Ca7			0,200	0,015	0,028			0,093	0,118	0,028	0	0
Ca9	0,049	0,065	0,100	0,093	0,014			0,053	0,059	0,104		0,055
Ga13	0,356	0,673	0,373	0,000	0,000			0,124	0,246	0		0
Je2			0,000	0,000	0,079			0,000	0	0,139		0,144
Je3			0,000	0,182	0,130			0,000		0,221		0,106
Je5			0,000	0,125	0,136			0,000	0	0,084		0,107
Li8		0,133	0,041	0,015	0,031					0		0,073
Ma4FE		0,130		0,077	0,324			0,011	0,033	0,000	0	0,029
Ma8FE		0,166		0,147	0,302			0,446	0,543	0,000		0,075
Ma4DE		0,250	0,318	0,077	0,033				0,159	0,365		
Ma6DE		0,260	0,241	0,033	0,244				0,07	0,164		
Me1		0,350	0,386	0,089					0,388	0,176		
Me2		0,196	0,078	0,089					0,411	0,169		
Ni5	0,066		0,0417	0,030	0,000			0,045	0,01	0,045	0	0,363
Ni12			0,043		0,097				0,033	0,1		0
Ni16	0,679	0,033	0,023	0	0,000				0,011	0,317		0
Ni24	0		0	0,04	0,000	0,000	0,000		0,000		0,000	0,040
Sa5				0,138	0,185				0	0,135		0,272
Sa6				0,125	0,167				0	0,156		0,203
Sa8				0,276	0,272				0	0,289		0,270
Si2	0	0,147	0	0,430				0,078	0	0,294		

IG: sévérité conditionnelle
nématodes à galle
%I: sévérité conditionnelle
champignons du collet

Annexe 5 : Script pour générer la distribution « expérimentale » de l'indice de concordance global

```
tablo<-read.table("tableau.txt",header=TRUE)
```

```
niveau<-tablo$niveau
```

```
dexi<-tablo$dexi
```

Fonction permettant de générer de façon aléatoire des n correspondance

```
genere.n <- edit()
```

```
genere.n
```

```
function (niv, n=28)
```

```
{
```

```
  Dexi.alea <- floor(runif(n,max=3))+1
```

```
  sum((niv-Dexi.alea)==0)
```

```
}
```

Génération de 10 000 n correpondances

```
n.alea <- rep(-1,10000)
```

```
for(i in 1:100000) n.alea[i] <- genere.n(niveau)
```

```
n.alea[1:10]
```

```
range(n.alea)
```

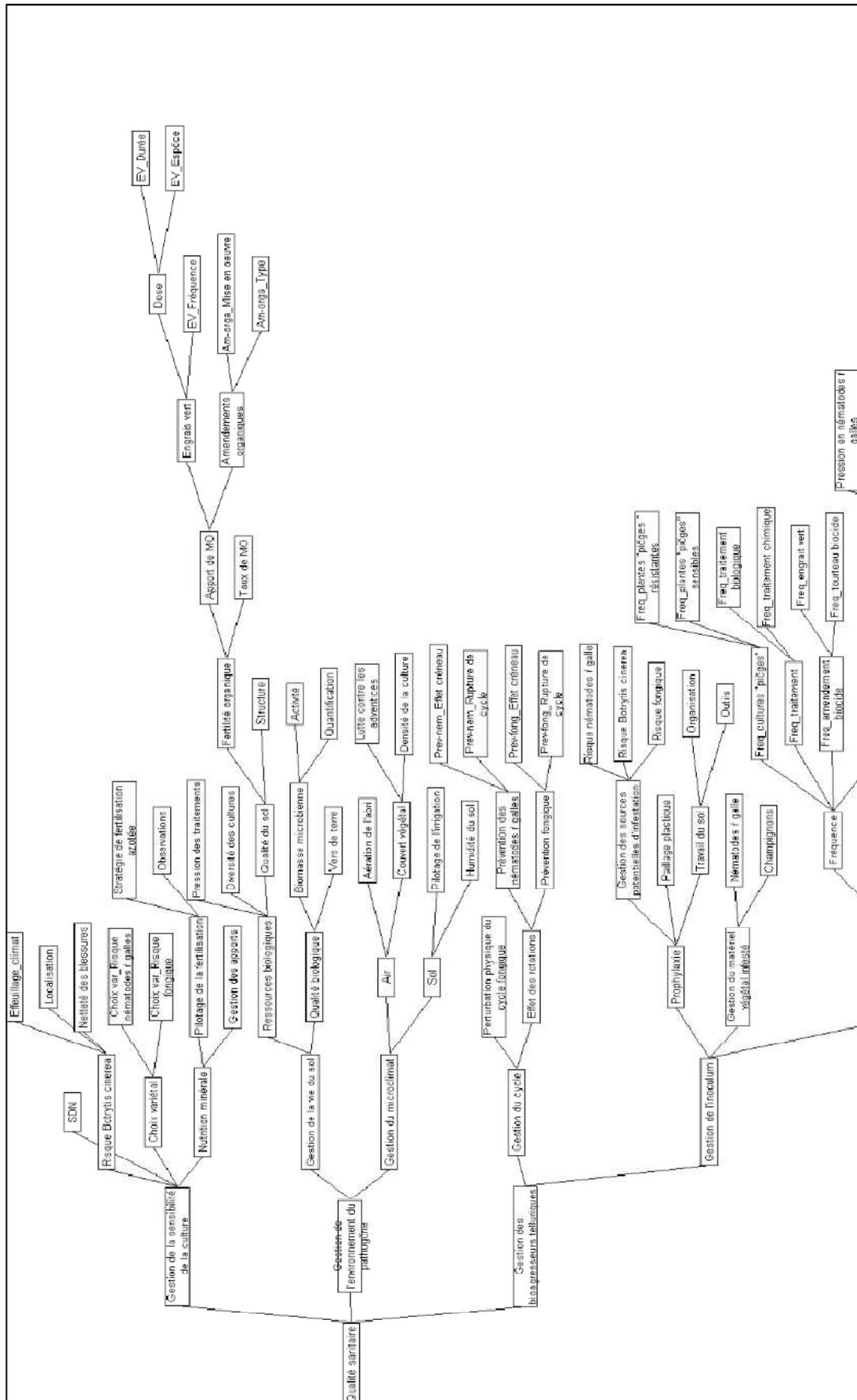
Représentation graphique des 10 000 n correspondances

```
hist(n.alea)
```

Détermination des quantiles

```
> quantile(n.alea,c(.8,.85,.9,.95))
```

Annexe 6 : Structure de l'arbre d'évaluation après enquêtes avec les conseillers



BAGES, Quentin, 2011, Construction et validation d'un outil d'évaluation multicritère de systèmes de culture en maraîchage sous abris froids vis-à-vis de la gestion des bioagresseurs telluriques, nombre de pages, mémoire de fin d'études, Clermont-Ferrand, 2011.

STRUCTURE D'ACCUEIL ET INSTITUTIONS ASSOCIEES:

- ◆ Institut National de Recherche Agronomique (INRA) – Département des Sciences pour l'Action et le Développement (SAD) – Centre d'Avignon – Unité d'Ecodéveloppement

ENCADRANTS :

- ◆ Maître de stage : TCHAMITCHIAN, Marc (INRA – Unité d'Ecodéveloppement)
- ◆ Tuteur pédagogique : CAPITAINE, Mathieu

OPTION : Agronomie Productions Végétales et Environnement

RESUMÉ

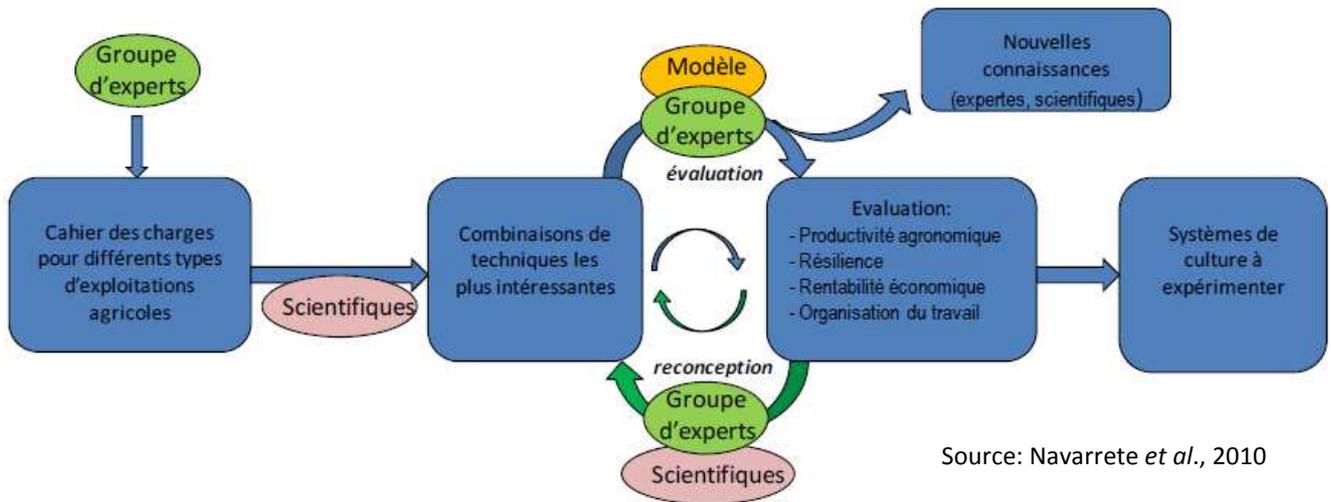
Ces dernières années, le durcissement de réglementation concernant l'utilisation des pesticides, lié à la prise de conscience des risques environnementaux et sanitaires de certains produits, entraîne progressivement leur interdiction d'utilisation. Les produits de désinfection du sol comme le bromure de méthyle, très utilisés dans les systèmes maraichers du Sud Est de la France pour lutter contre les bioagresseurs telluriques, sont aujourd'hui interdits d'utilisation. Cette disparition des produits de désinfection du sol amène actuellement les producteurs maraîchers à reconcevoir leurs systèmes de culture en mobilisant des techniques alternatives aux traitements chimiques pour contrôler les bioagresseurs telluriques dans les abris. Dans ce contexte, un projet mêlant chercheurs et conseillers techniques est conduit à l'INRA d'Avignon, pour réfléchir à la conception de systèmes de culture innovants.

Ce travail, consiste en la mise au point (construction et validation) d'un outil de support à la réflexion sur des prototypes de systèmes innovants combinant différentes techniques alternatives de gestion des bioagresseurs, qui sera utilisé dans le processus de co-conception. Cet outil est basé sur un modèle d'évaluation multicritère et qualitatif permettant l'évaluation de systèmes de culture en maraîchage sous abri froid vis-à-vis de la gestion de plusieurs bioagresseurs telluriques. L'outil une fois mis au point sera utilisé pour sélectionner des prototypes de systèmes innovants prometteurs qui pourront être testés en parcelles expérimentales.

La construction et la validation du modèle d'évaluation multicritère s'est faite en mobilisant diverses sources de connaissances. La construction est assurée en mobilisant l'expertise de conseillers techniques afin de compléter des connaissances scientifiques parfois lacunaires sur les techniques alternatives de gestion des bioagresseurs.

La validation du modèle à la fois multicritère et qualitatif s'appuie sur une méthode de validation visant à la recherche de cohérence entre les sorties qualitatives du modèle et la réalité du « terrain » décrite à partir de données d'observation ou de l'expertise de conseillers techniques. Des méthodes de construction et de validation d'un modèle d'évaluation multicritère et qualitatif sont donc proposées dans ce travail. Ce travail amène à s'interroger sur la démarche de construction et de validation d'un outil d'évaluation multicritère et qualitatif ainsi que sur l'intérêt de l'utilisation d'un outil d'évaluation multicritère et qualitatif dans le processus de co-conception de systèmes de culture.

Mots clés : analyse multicritère, validation qualitative, systèmes de culture, maraîchage sous abri, contrôle des pathogènes



Source: Navarrete *et al.*, 2010

Figure 1: Schéma de la démarche de co-conception de systèmes de culture innovants



Figure 2: Localisation géographique de la région PACA

Source : <http://www.itinerairesbis.com/hebergement/hotelrestfr.htm>



Figure 3: Carte de Provence

Source : <http://www.web-provence.com/carte.htm>

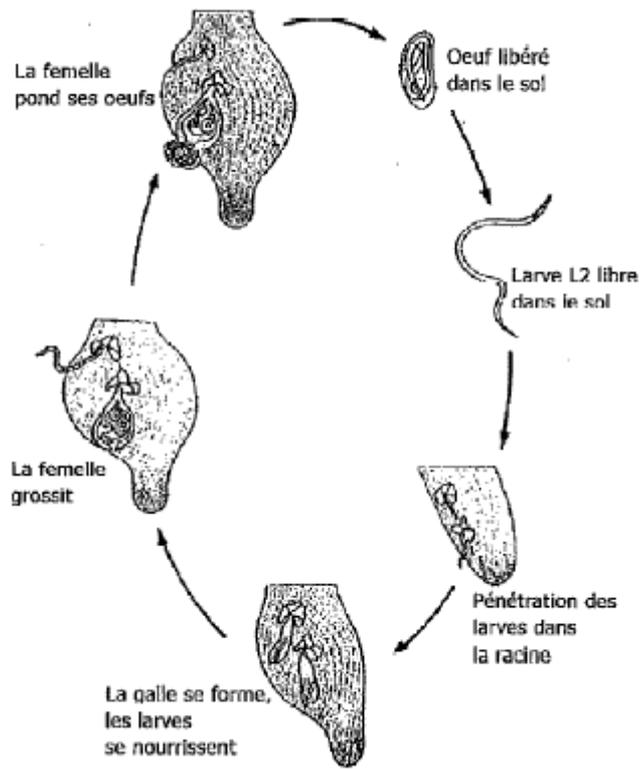


Figure 4: Schéma du cycle de développement de nématode à galles *Meloidogyne* spp.

Source : Bertrand, 2001

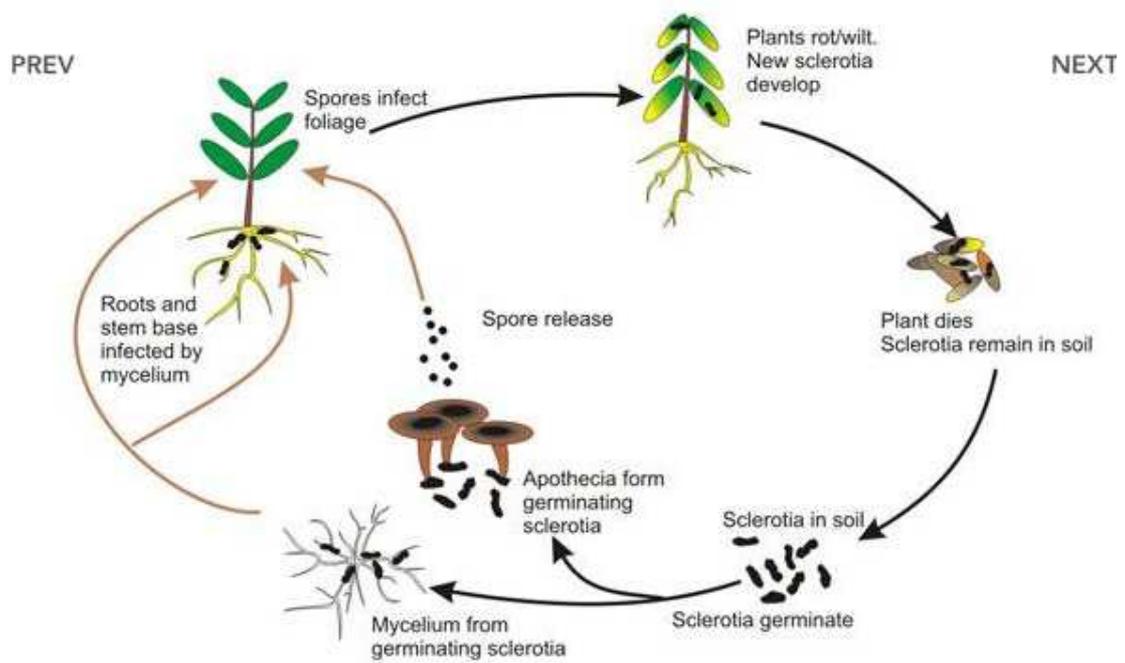


Figure 5: Schéma du cycle de développement de *Sclerotinia* spp.

Source : <http://www.hdc.org.uk/herbs>

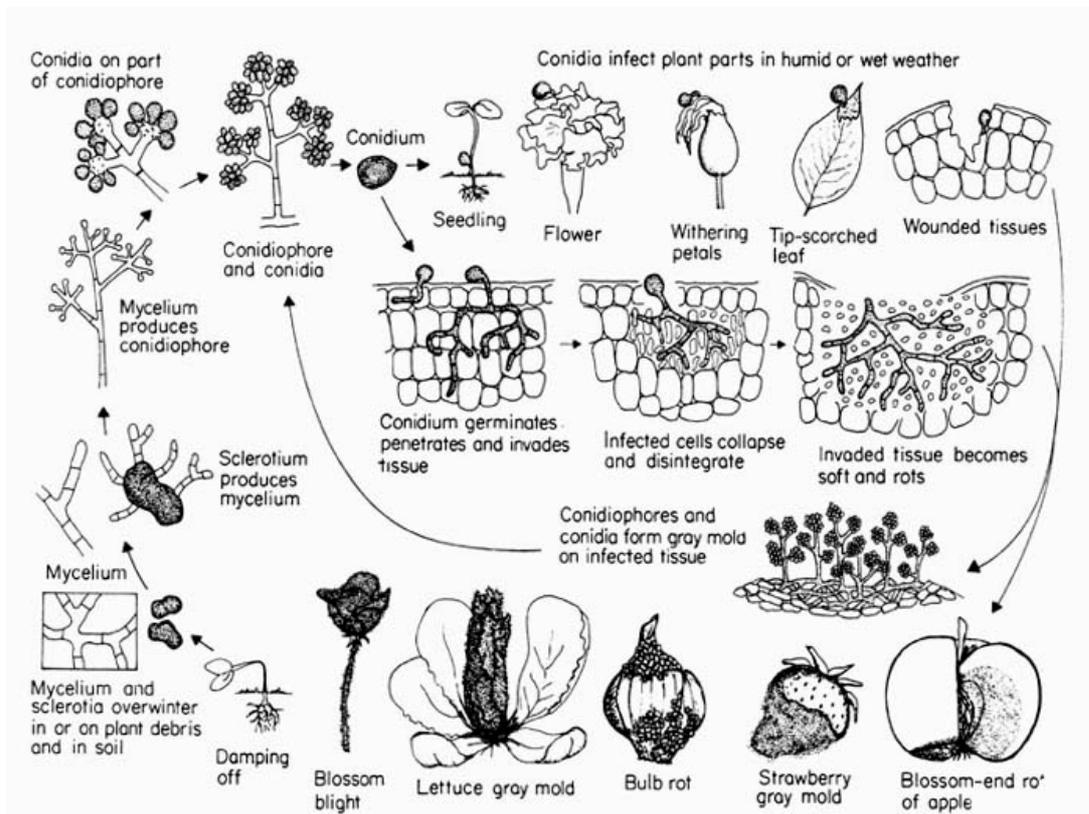


Figure 6: Schéma du cycle de développement de *Botrytis cinerea*

Source : http://www.ehow.com/how-does_5180705_life-cycle-botrytis.html

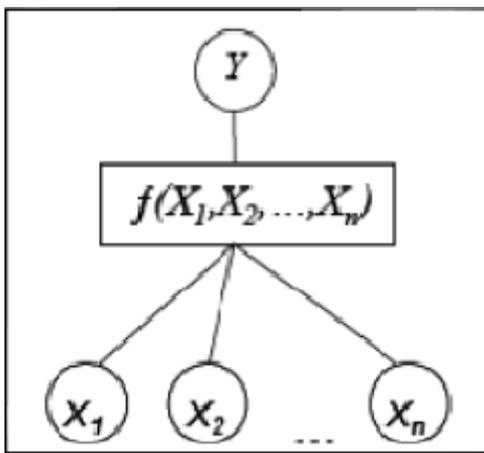


Figure 8: Structure d'une fonction d'utilité sous DEXi

	X1	X2	Y
1	faible	faible	faible
2	faible	moyen	faible
3	faible	elevé	moyen
4	moyen	faible	faible
5	moyen	moyen	moyen
6	moyen	elevé	elevé
7	elevé	faible	moyen
8	elevé	moyen	elevé
9	elevé	elevé	elevé

Figure 7: Exemple d'une table de contingence

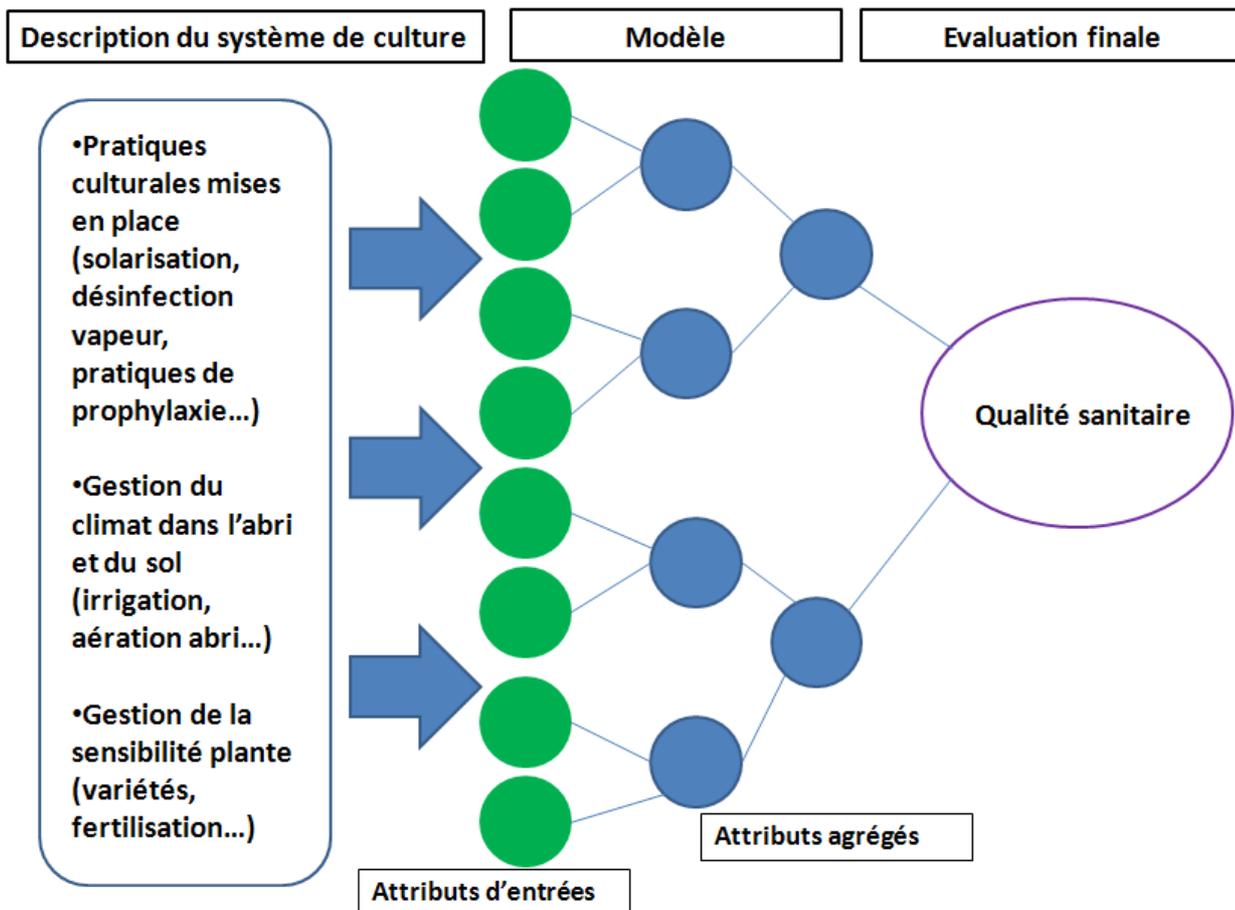


Figure 9: Schéma du fonctionnement du modèle d'évaluation multicritère

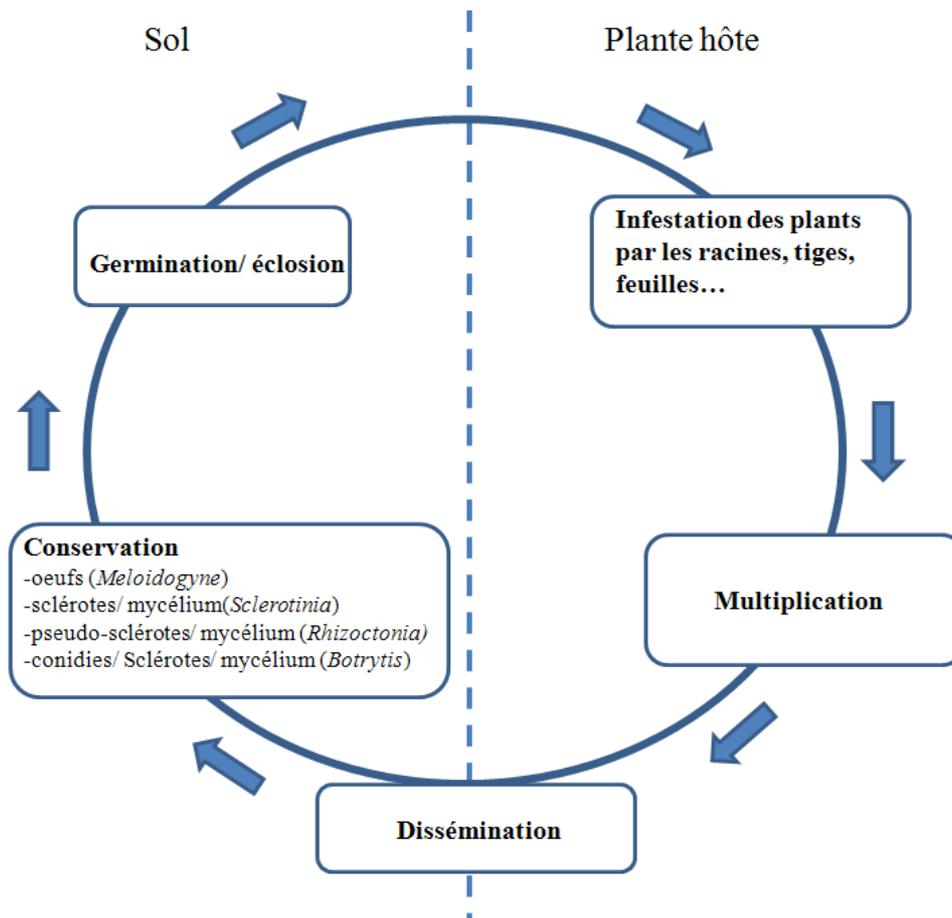


Figure 10: Cycle théorique regroupant des traits communs aux cycles des différents bioagresseurs

<i>Noms</i>	<i>Organismes</i>
Christelle Aissa-Madani	Groupe de Recherche en Agriculture Biologique (Avignon)
Laurent Camoin	Chambre d'Agriculture des Bouches du Rhône
Thierry Corneille	Centre d'Etudes Techniques Agricoles de Châteaurenard
Daniel Izard	Chambre d'Agriculture du Vaucluse
Catherine Mazollier	Groupe de Recherche en Agriculture Biologique (Avignon)

Tableau 1: Liste des experts rencontrés

A	B	C	D	E	F
3	0	4	5		Culture observée : Melon franc
3	0	0	-		
6	0	3	-		
5	1	3	5		Date du diagnostic :05,08,08
4	0	3	4		Noms des diagnostiqueurs : BC
0	0	4	6		
0	0	3	5		Orientation de l'abri
3	0	0	9		
0	0	3	6		
3	0	3	6		
0	0	4	5		
5	0	3	6		
1	0	3	8		Distances inter-rangs et les distances entre les rangs extérieurs et
0	0	4	10		les bords du tunnel :
2	0	7	10		[AB] =63 cm
1	0	6	9		[BC] =200cm
0	0	7	7		[CD] =250 cm
1	3	8	7		[DE] =185 cm
2	3	-	7		[EF] = 70 cm
1	3	-	7		
1	4	9	10		
3	3	-	10		Distance entre deux arceaux :
0	2	10	10		$d(0,1) = d(1,2) = 190$ cm
0	2	9	3		
0	1	6	5		
0	2	9	6		Mesurer l'écartement entre le plant observé et l'arceau le plus proche :
0	2	7	9		
2	0	6	4		

Figure 11: Exemple de carte d'infestation en nématodes à galles sur melon

	nb S atteintes	nb S atteintes
1		
3	0	0
5	0	0
7	0	0
9	0	0
11	0	0
13	0	0
15	0	0
17	0	0
19	0	0
21	0	0
23	0	0
25	0	0
27	0	1
29	0	0
31	1	0
33	0	0
35	0	0
37	0	1
39	0	0
41	0	0
43	0	1
45	0	0
47	0	0
49	0	1
51	0	0
53	0	0
55	0	0
57	0	0

Figure 12: Exemple de carte d'infestation en champignons du collet sur salades

	moyenne IG	moyenne %I
Bo3	0,000	0,203
Bo8	0,000	0,139
Bo19	0,048	0,348
Ca1	0,070	0,061
Ca2	0,050	0,042
Ca3	0,210	0,032
Ca4	0,042	0,026
Ca7	0,137	0,018
Ca9	0,065	0,066
Ga13	0,354	0,000
Je2	0,000	0,091
Je3	0,000	0,160
Je5	0,000	0,113
Li8	0,087	0,030
Ma4FE	0,058	0,108
Ma8FE	0,385	0,131
Ma4DE	0,242	0,158
Ma6DE	0,190	0,147
Me1	0,375	0,133
Me2	0,228	0,129
Ni5	0,041	0,110
Ni12	0,038	0,066
Ni16	0,186	0,079
Ni24	0,000	0,027
Sa5	0,000	0,183
Sa6	0,000	0,163
Sa8	0,000	0,277
Si2	0,045	0,362

IG: moyenne des indices d' infestation en nématodes par tunnel

%I: moyenne des indices d' infestation en champignons du collet par tunnel

Tableau 2: Infestations moyennes en nématodes à galle et en champignons par tunnel

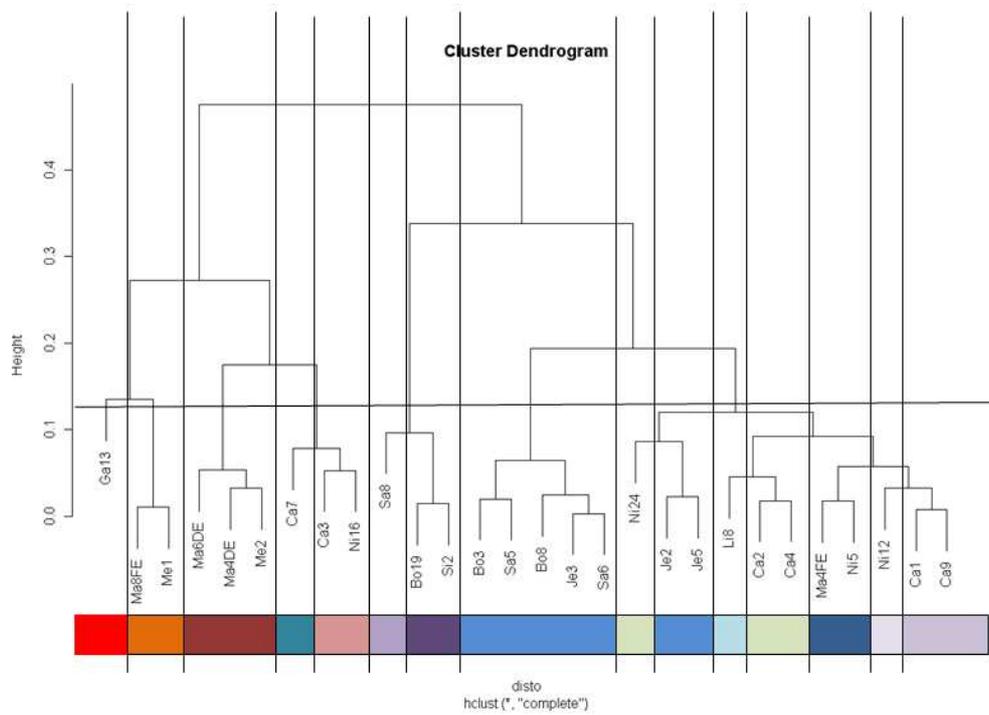


Figure 13: Dendrogramme représentant la CAH des tunnels

Classification des tunnels selon les indices d'infestation	
Ni24	Niveau d'infestation très faible en nématodes et en champignons
Ca4	
Ca2	
Ni12	Niveau d'infestation très faible en nématodes et faible champignons
Li8	Niveau d'infestation faible en nématodes et très faible en champignons
Ca1	Niveau d'infestation faible en nématodes et en champignons
Ca9	
Je2	
Je5	Niveau d'infestation très faible en nématodes et modéré en champignons
Bo8	
Bo3	
Sa5	
Sa6	
Je3	
Ca7	Niveau d'infestation modéré en nématodes et très faible en champignons
Ma4FE	Niveau d'infestation faible en nématodes et modéré en champignons
Ni5	
Sa8	Niveau d'infestation très faible en nématodes et élevé en champignons
Bo19	Niveau d'infestation faible en nématodes et très élevé en champignons
Si2	
Ca3	Niveau d'infestation élevé en nématodes et modéré en champignons
Ni16	
Ma4DE	
Ma6DE	Niveau d'infestation élevé en nématodes et modéré en champignons
Me2	
Me1	Niveau d'infestation très élevé en nématodes et modéré en champignons
Ma8FE	
Ga13	Niveau d'infestation très élevé en nématodes et très faible en champignons

Figure 14: Classification des tunnels selon les indices moyens d'infestation

Classification des tunnels selon les indices d'infestation		Classification des tunnels selon les niveaux d'infestation en bioagresseurs telluriques
Ni24 Ca4 Ca2	Niveau d'infestation très faible en nématodes et en champignons	très faible
Ni12 Li8	Niveau d'infestation très faible en nématodes et faible/très faible champignons Niveau d'infestation faible en nématodes et très faible en champignons	faible
Ca1 Ca9	Niveau d'infestation faible en nématodes et en champignons	
Je2 Je5 Bo8 Bo3 Sa5 Sa6 Je3	Niveau d'infestation très faible en nématodes et modéré en champignons	modéré
Ca7	Niveau d'infestation modéré en nématodes et très faible en champignons	
Ma4FE Ni5	Niveau d'infestation faible en nématodes et modéré en champignons	
Sa8	Niveau d'infestation très faible en nématodes et élevé en champignons	
Bo19 Si2	Niveau d'infestation faible en nématodes et très élevé en champignons	
Ca3 Ni16	Niveau d'infestation élevé en nématodes et modéré en champignons	
Ma4DE Ma6DE Me2	Niveau d'infestation élevé en nématodes et modéré en champignons	élevé
Me1 Ma8FE	Niveau d'infestation très élevé en nématodes et modéré en champignons	
Ga13	Niveau d'infestation très élevé en nématodes et très faible en champignons	

Figure 15: Classification à 4 niveaux selon les niveaux d'infestation en bioagresseurs

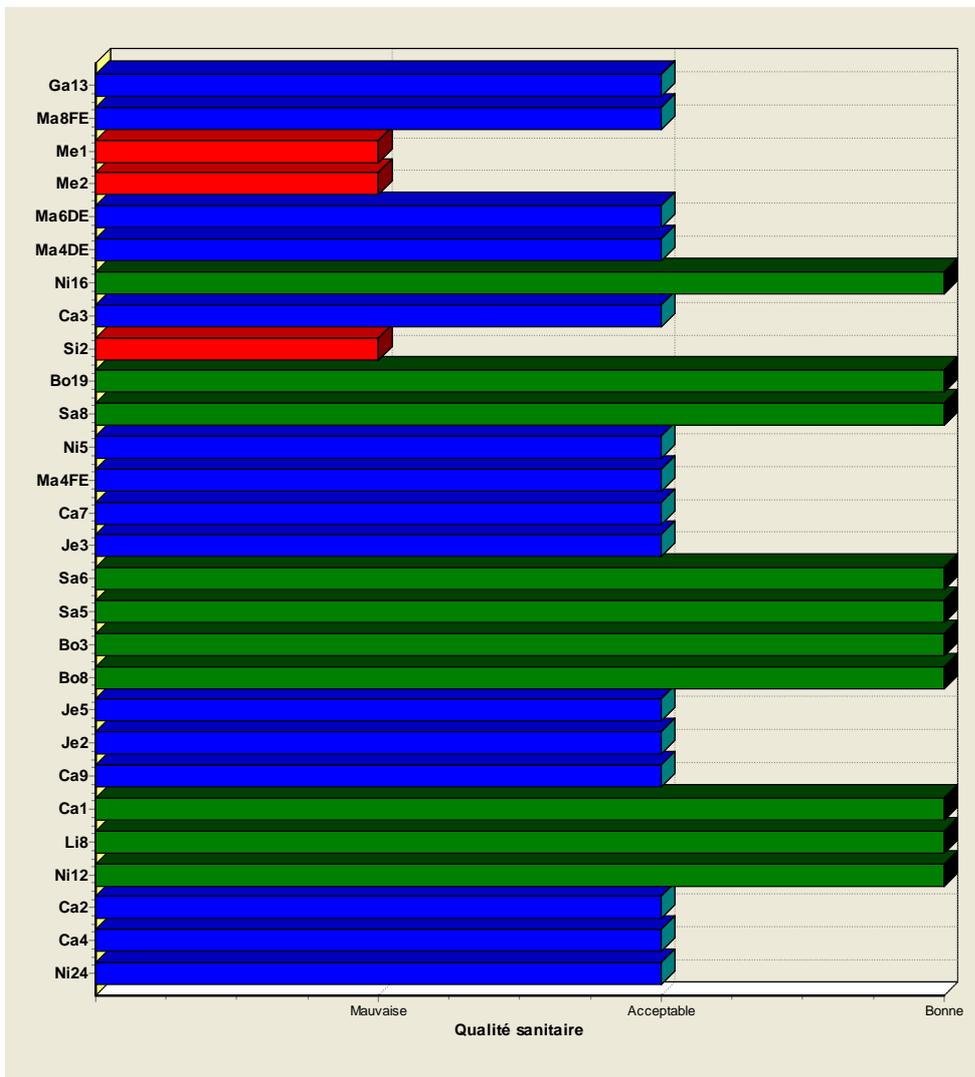


Figure 16: Histogramme représentant les évaluations de la qualité sanitaire des 28 systèmes de culture

Systèmes de cultures	Niveaux d'infestation selon la classification	Evaluation de la qualité sanitaire obtenue avec l'outil
Ga13	Elevé	Acceptable
Ma8FE		Acceptable
Me1		Mauvaise
Me2		Mauvaise
Ma6DE		Acceptable
Ma4DE		Acceptable
Ni16		Bonne
Ca3		Acceptable
Si2		Mauvaise
Bo19		Bonne
Sa8		Bonne
Ni5		Modéré
Ma4FE	Acceptable	
Ca7	Acceptable	
Je3	Acceptable	
Sa6	Bonne	
Sa5	Bonne	
Bo3	Bonne	
Bo8	Bonne	
Je5	Acceptable	
Je2	Acceptable	
Ca9	Faible	Acceptable
Ca1		Bonne
Li8		Bonne
Ni12		Bonne
Ca2	Très faible	Acceptable
Ca4		Acceptable
Ni24		Acceptable

Tableau 3 : Confrontation des niveaux d'infestation selon la classification et des évaluations de la qualité sanitaire par système de culture

<i>Légende :</i>
système : systèmes de culture
niveau : niveaux d'infestation selon la classification
dexi : évaluations de la qualité sanitaire obtenues avec le modèle

système	niveau	dexi
Ga13	3	2
Ma8FE	3	2
Me1	3	3
Me2	3	3
Ma6DE	3	2
Ma4DE	3	2
Ni16	3	1
Ca3	3	2
Si2	3	3
Bo19	3	1
Sa8	3	1
Ni5	2	2
Ma4FE	2	2
Ca7	2	2
Je3	2	2
Sa6	2	1
Sa5	2	1
Bo3	2	1
Bo8	2	1
Je5	2	2
Je2	2	2
Ca9	1	2
Ca1	1	1
Li8	1	1
Ni12	1	1
Ca2	1	2
Ca4	1	2
Ni24	1	2

Tableau 4: codage des valeurs qualitatives en valeurs numériques utilisables dans R

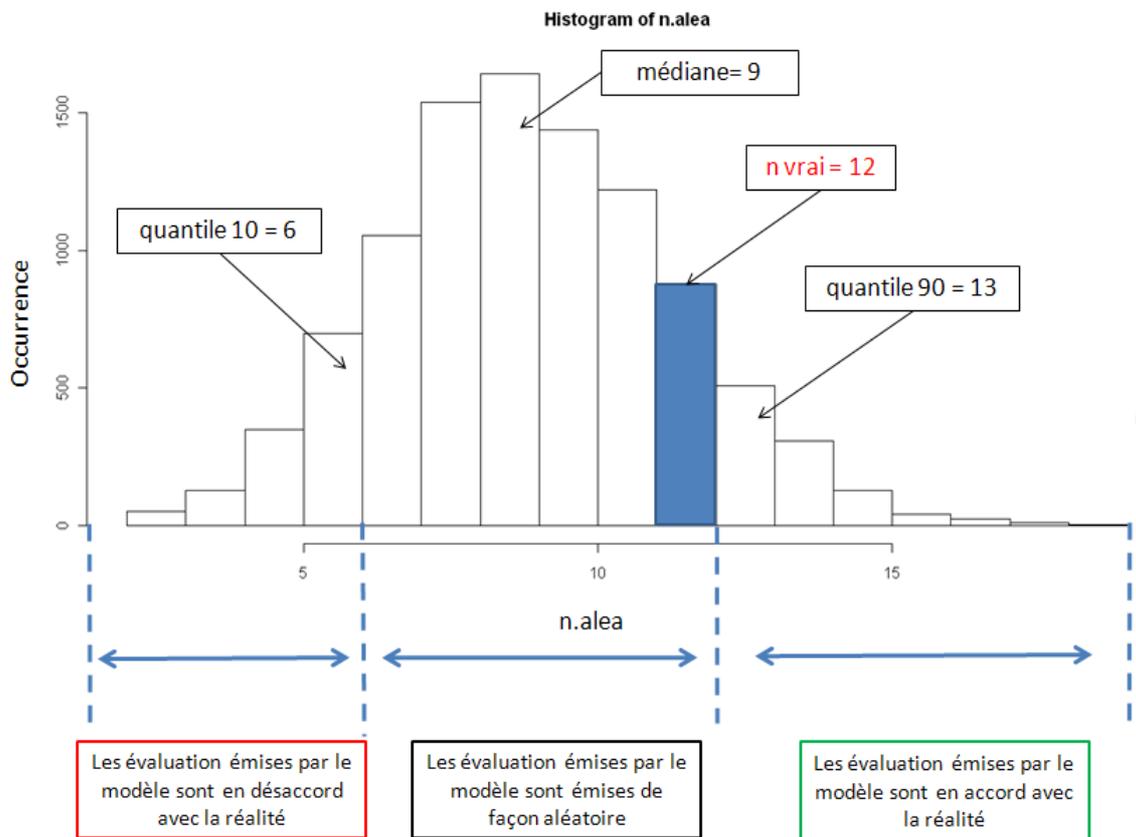


Figure 17: Distribution de fréquence des valeurs de l'indice de concordance global