



Doctorat ParisTech

THÈSE

pour obtenir le grade de docteur délivré par

L'Institut des Sciences et Industries du Vivant et de l'Environnement (AgroParisTech)

Spécialité : Agronomie

présentée et soutenue publiquement par

Laure HOSSARD

le 13 décembre 2012

Conception participative et évaluation numérique de scénarios spatialisés de systèmes de culture.

Cas de la gestion du phoma du colza et de la durabilité des résistances

Directeur de thèse : **Marie-Hélène JEUFFROY**
Co-encadrement de la thèse : **Véronique SOUCHERE**

Jury

Mme Nathalie COLBACH, Directeur de Recherche, UMR Agroécologie, INRA
M. Guy TREBUIL, Directeur de Recherche, Département TERA, CIRAD
M. Thierry DORE, Professeur, AgroParisTech
M. Hervé MONOD, Directeur de Recherche, UMR MIA, INRA
M. Frédéric FABRE, Chargé de Recherche, Unité de Recherches de Pathologie Végétale, INRA
M. Xavier PINOCHET, Direction Scientifique, CETIOM
Melle Véronique SOUCHERE, Ingénieur de Recherche, UMR SADAPT, INRA/AgroParisTech

Rapporteur
Rapporteur
Examineur
Examineur
Examineur
Examineur
Encadrante

Sommaire

Liste des publications et communications.....	4
Liste des sigles et abréviations	5
Liste des Figures.....	6
Liste des Tables	9
Liste des Equations	11
Liste des Encadrés	12
Introduction générale	13
Chapitre 1. Etat de l’art et problématique	18
1. Les leviers de gestion des bioagresseurs en grandes cultures	19
1.1. Le levier génétique	19
1.2. Le levier agronomique	21
1.3. Gérer le levier génétique par le levier agronomique.....	22
2. Comment concevoir des scénarios d’organisation spatiale des systèmes de culture ?.....	25
2.1. Typologie des scénarios et de leurs méthodes de production.....	25
2.2. Comment combiner une méthode participative et une méthode analytique ? Eléments de l’état de l’art.....	34
3. Comment analyser des scénarios supraparcellaires de systèmes de culture pour gérer un bioagresseur ou un problème de flux ?	42
3.1. De l’échelle de la parcelle à l’échelle du territoire agricole.....	42
3.2. Caractérisation des stratégies agricoles supraparcellaires et de leurs impacts	43
3.3. Application en épidémiologie végétale et à la durabilité des résistances.....	45
4. Le cas d’étude utilisé dans cette démarche : le phoma du colza	48
4.1. La culture du colza.....	48
4.2. Description du pathosystème.....	48
4.3. Leviers pour la gestion.....	49
5. Questions et démarche de recherche	52
Chapitre 2. Matériels et Méthodes	55
1. Le modèle SIPPOM-WOSR	57
1.1. Structure.....	57
1.2. Entrées du modèle	61
1.3. Sorties du modèle	63
1.4. Améliorations réalisées et validation.....	63
2. Présentation des deux terrains d’étude	71
2.1. Critères de choix des régions d’étude	71
2.2. Présentation des deux régions d’étude	73
3. Dispositif de recherche	74
3.1. Composition des groupes d’acteurs pour l’application de la démarche participative.....	74
3.2. Caractérisation des pratiques agricoles et échelle d’étude	74

3.3. Analyses statistiques.....	74
Chapitre 3. Conception et application d'une méthode générique de construction participative de scénarios de systèmes de culture incluant du colza. Application au contrôle du phoma du colza et à la gestion des résistances dans deux terrains d'étude	75
1. Présentation de la méthode participative de construction des scénarios et application au contrôle du phoma du colza et à la gestion des résistances en région Centre	77
1.1. Résumé/Abstract.....	77
1.2. Introduction.....	78
1.3. Materials and methods	80
1.4. Results.....	87
1.5. Conclusion	98
1.6. Acknowledgments	99
2. Application de la démarche à la 2 ^{ème} région d'étude : la région Picardie	100
2.1. Identification et enquêtes des principaux acteurs	100
2.2. Construction d'une vision partagée du fonctionnement du phoma du colza et des acteurs agissant sur la gestion de la maladie et de situations de référence	104
2.3. Construction participative des situations de référence et des scénarios spatialisés de systèmes de culture.....	106
2.4. Evaluations des scénarios à l'aide du modèle SIPPOM-WOSR	111
2.5. Discussion collective sur l'évaluation numérique des scénarios co-construits	113
Chapitre 4. Quels déterminants principaux de l'évolution du phoma du colza dans les futurs proposés ?.....	116
1. Résumé/Abstract	118
2. Introduction.....	119
3. Materials and Methods	120
3.1. Presentation of the model.....	120
3.2. The two studied areas	120
3.3. Model-based scenario simulation and statistical analysis.....	126
4. Results	128
4.1. The Centre region	128
4.2. The Picardie region.....	131
5. Discussion.....	135
5.1. Back to the participatory approach: limitations and advantages	135
5.2. Effects of modifying cropping practices on phoma stem canker control, resistance sustainability and yield losses	137
5.3. Scale effects and location factors	139
6. Conclusion	140
7. Acknowledgments.....	140
Chapitre 5. Effet de la spatialisation des systèmes de culture : influence des caractéristiques du paysage local et effet de règles de décision.....	142
1. Etude de l'impact de la localisation des systèmes de culture sur l'augmentation de la durabilité des résistances au phoma chez le colza.....	144

1.1.	Résumé/Abstract.....	144
1.2.	Introduction.....	146
1.3.	Material and Methods	148
1.4.	Results.....	152
1.5.	Discussion	156
1.6.	Acknowledgments	158
2.	Exploration de règles spatiales d'isolement et d'association de pratiques culturales (type variétal et gestion des résidus).....	160
2.1.	Règles de décision	160
2.2.	Résultats.....	166
Chapitre 6.	Discussion générale	173
1.1.	Démarche de construction de scénarios	175
1.2.	Retour sur l'outil d'évaluation des scénarios et sa place dans la démarche	181
1.3.	Synthèse des principaux avantages et limites de la méthode de construction des scénarios 188	
2.	Retour sur l'application de la démarche, les scénarios et leur analyse.....	189
2.1.	Comparaison des résultats de l'application de la méthode participative entre les deux régions	189
2.2.	Vers des indicateurs de durabilité des résistances locaux et contextualisés.....	192
3.	De la nécessité d'une approche plus large de la gestion des bioagresseurs	194
3.1.	Echelles et critères de décision : de la nécessité d'une approche plus systémique.....	194
3.2.	Approches individuelles vs. collectives	196
	Conclusion et perspectives	197
	Références	199
	Annexes	222
	Liste des Annexes	222
	Annexe A. Données pédologiques de simulation	222
	Annexe B. Pratiques culturales détaillées à l'échelle de la région	224
	Annexe C. Données climatiques de simulation	226
	Annexe D. Présentation des rotations de la situation de référence utilisée en région Centre.....	228
	Annexe E. Questionnaire d'évaluation de la méthode <i>ex post</i>	229
	Annexe F. Diagramme des ressources du modèle SIPPOM-WOSR	230
	Annexe G. Diagramme ARDI construit collectivement en région Centre : Ressources.....	231
	Annexe H. Diagramme ARDI construit collectivement en région Centre : Schéma simplifié	232

Liste des publications et communications

1.1. Publications scientifiques

Hossard L., Gosme, M., Souchere V., Jeuffroy M.H. Evidence of cropping system localization for the increase of resistance sustainability. A model-based study on phoma stem canker of winter oilseed rape. *En projet*

Hossard L., Jeuffroy M.H., Pelzer E., Pinochet X., Souchere V. A participatory approach to design spatial scenarios of cropping systems and assess their effects on phoma stem canker management at a regional scale. *Soumis à Environmental Modelling & Software* en mai 2012

Hossard L., Souchere V., Pelzer E., Pinochet X., Jeuffroy M.H. Cropping systems management at a regional scale for the sustainable management of phoma stem canker: a model-based assessment of locally-designed spatial scenarios. *Soumis à Agriculture, Ecosystems & Environment* en juillet 2012.

Hossard L., Lannou C., Papaix J., Monod H., L -Pelzer E., Souchère V., Jeuffroy M.H., 2010. Quel déploiement spatio-temporel des variétés et des itinéraires techniques pour accroître la durabilité des résistances variétales ? *Innovations Agronomiques*, 8, 15-33.

1.2. Communications et posters

Hossard L., Souchere V., Pelzer E., Pinochet X., Jeuffroy M.H., 2012. Conception et simulation de scenarios de gestion durable des resistances au phoma du colza avec une version améliorée du modèle spatio-temporel SIPPOM-WOSR. 10 me Conférence Internationale sur les Maladies des Plantes. Tours, France, 3-5 Décembre 2012. (soumis pour communication orale)

Hossard L., Souchere V., Jeuffroy M.H., 2012. Spatial cultivar deployment and residue management: what impact for phoma stem canker of winter oilseed rape and resistance sustainability? Plant Resistance Sustainability International Congress. La Colle sur Loup, France, 16-19 Octobre 2012. (communication orale)

Hossard L., Jeuffroy M.H., Souchère V., 2012. Construire et évaluer des scenarios de gestion spatial des systèmes de culture pour accroître la durabilité des résistances au phoma chez le colza : méthode et exemples de deux terrains contrastés. 9 mes Rencontres de Phytopathologie-Mycologie de la Société Française de Phytopathologie, p. 47, Aussois, France, 16-20 janvier 2012. (communication orale)

Hossard L., Jeuffroy M.H., Souchere V., 2011. Designing sustainable management scenarios to control blackleg of winter oilseed rape from a combination of participative design and model simulations. 13 me Congrès International du Colza, pp. 85, Prague, République Tch que. 5- 9 juin 2011. (communication orale)

Hossard L., L -Pelzer E., Pinochet X., Bousset L., Aubertot J.N., Souchere V., Jeuffroy M.H., 2011. Improvements of the SIPPOM-WOSR model for evaluation of management scenarios towards control of blackleg of winter oilseed rape. 13 me Congrès International du Colza, pp. 85, Prague, République Tchèque. 5- 9 juin 2011. (poster)

Liste des sigles et abréviations

BSV : Bulletin de Santé du Végétal

CA : Chambre d'Agriculture

CETA : Centre d'Etudes Techniques Agricoles

CETIOM : Centre Technique des Oléagineux

CIPAN : Culture Piège à Nitrates

CTPS : Centre Technique Permanent de la Sélection

DI : Indice de maladie (Disease Index), i.e. la note G2 pour le pathosystème phoma du colza

GEDA : Groupe d'Etudes et de Développement Agricole

GEVES : Groupe d'Etude et de contrôle des Variétés Et des Semences

IFT : Indice de Fréquence de Traitement

OGM : Organisme Génétiquement Modifié

OS : Organisme de collecte et de Stockage

RQ : résistance quantitative

SADAPT : Sciences pour l'Action et le Développement : Activités Produits Territoires

SAU : Surface Agricole Utile

SdC : Système de culture

SIPPOM-WOSR: Simulator for Integrated Pathogen POPulation Management for Winter Oilseed Rape

TCS : Techniques Culturelles Simplifiées

WOSR: colza d'hiver (Winter OilSeed Rape)

Liste des Figures

Figure 1.1. Fonctionnement de la résistance spécifique (adapté de Flor, 1971).....	19
Figure 1.2. Typologie des scénarios selon Börjeson <i>et al.</i> (2006).	24
Figure 1.3. Typologie des études sur le futur (source: van Ittersum <i>et al.</i> , 1998, adapté de Becker et Dewulf, 1989).....	26
Figure 1.4. Classification des types de scénarios en fonction de leur incertitude et de la complexité du système appréhendé selon Zurek et Henrichs (2007)	26
Figure 1.5. Classification des types de scénarios et de leurs méthodes de développement selon Alcamo et Henrichs (2008).	26
Figure 1.6. Grille de lecture appliquée pour typer les études/ approches utilisant à la fois une méthode participative et un modèle informatique.....	34
Figure 1.7. Implication des acteurs pour la construction du modèle et des scénarios dans les principaux cas d'étude présentés.....	35
Figure 1.8. Impacts de la structure du paysage sur la propagation invasive d'un agent pathogène (source : adapté de With, 2002).....	41
Figure 1.9. Définition de l'assolement : la proportion des surfaces par culture (a) et l'allocation spatiale des cultures (b) sont les deux éléments emboîtés d'un assolement (source : Dury <i>et al.</i> , 2012)	43
Figure 1.10. Evolution des surfaces et des rendements de colza de 1990 à 2010 (source : Agreste, 2011).	47
Figure 1.11. Cycle du phoma du colza et moyens de gestion (adapté de Aubertot <i>et al.</i> , 2004a ; Hall, 1992 ; West <i>et al.</i> , 2001).....	47
Figure 1.12. Evolution temporelle des fréquences des pathotypes avirulents (Avrlm) et virulents (avrlm) sur le gène de résistance spécifique Rlm1 et des surfaces cultivées avec des variétés porteuses de ce gène (source : Rouxel <i>et al.</i> , 2003)	50
Figure 1.13. Schéma illustrant la démarche générale de ce travail de thèse et les questions de recherche abordées dans les différents chapitres	53
Figure 2.1 Diagramme de fonctionnement de SIPPOM-WOSR (source : Lô-Pelzer <i>et al.</i> , 2010b).....	56
Figure 2.2. Structure, entrées et sorties du modèle SIPPOM-WOSR (adapté de Lô-Pelzer <i>et al.</i> , 2010a)	57
Figure 2.3. Fonctionnement du modèle SIPPOM pour une année de simulation (adapté de Lô-Pelzer <i>et al.</i> , 2010a).....	58
Figure 2.4. Exemple de découpage d'un petit paysage agricole composé de huit champs (noir, violet, vert, rouge, cyan, rose, bleu foncé et jaune).	58
Figure 2.5. Evaluation des fréquences des pathotypes associées aux gènes de résistance Rlm1 et Rlm4 après insertion du gène Rlm1 ; (a) fréquences simulées ; (b) fréquences observées (issues de Rouxel <i>et al.</i> , 2003). Pour les pathotypes en légende, a et A signifient respectivement la virulence et l'avirulence. (Source: Lô-Pelzer <i>et al.</i> , 2010a).....	62
Figure 2.6. Changement de mode de représentation du spatial du raster (A) au vectoriel (B): l'unité de base de calcul passe du pixel à la parcelle.....	65
Figure 2.7. Comparaison du nombre de spores émises selon les modifications de SIPPOM-WOSR réalisées.....	68
Figure 2.8. Comparaison des structures de la population pathogène selon les modifications de SIPPOM-WOSR réalisées.....	68
Figure 2.9. Comparaison des notes G2, pour l'ensemble des parcelles, avec et sans modification de la représentation du spatial et ajout des conditions de durée d'humectation nécessaire à l'infection.	69

Figure 2.10. Comparaison des notes G2, pour les parcelles avec données mesurées, avec et sans modification de la représentation du spatial et ajout des conditions de durée d'humectation nécessaire à l'infection.	69
Figure 2.11. Parcelles-supports de simulation pour les deux régions d'étude.....	73
Figure 3.1. Location of (A) study site (white rectangle) and (B) landscape modelling support.....	80
Figure 3.2. Schematic representation of the methodological approach developed in this study. Circular arrows represent feedback loops.....	81
Figure 3.3. Structure, inputs and outputs of the model SIPPOM-WOSR (adapted from L ^o -Pelzer <i>et al.</i> , 2010a)	85
Figure 3.4. Examples of graphical representations of scenario evaluations per trend, highlighting the most significant cropping characteristics for the considered output.	86
Figure 3.5. Stakeholders' involvement in the management of phoma stem canker of oilseed rape: visions of the main stakeholders about stakeholders' concern and courses of action.	86
Figure 3.6. Example of one year-random cultivar allocation (3 replicates of the same scenario).	92
Figure 3.7. Scenarios simulation results (three replicates): yield losses depending on Frequency of virulent pathotypes on RlmX-cultivar (figures a, b, c) and Size of total pathogen population (figures d, e, f) for trend B.	93
Figure 3.8. Scenario simulation results (only one replicate presented): yield losses depending on frequency of virulent pathotypes on RlmX-cultivar (figures a, b) and size of total pathogen population (figures c, d) for trends A and C.....	94
Figure 3.9. Vision des principaux acteurs locaux sur les degrés de concernement et moyens d'action vis-à-vis de la gestion du phoma, par les acteurs de la région Picardie interviewés.....	101
Figure 3.10. Diagramme ARDI (Acteurs, Ressources, Dynamiques, Interactions) réalisé de manière collective en région Picardie. Les flèches bleues représentent une dynamique lorsqu'elles relient deux ressources et une interaction lorsqu'elles relient deux acteurs ou un acteur et une ressource.....	105
Figure 3.11. Localisation de la région d'étude et du parcellaire agricole support de simulation pour la région Picardie.....	111
Figure 3.12. Exemple de trois allocations aléatoires du colza sur le territoire agricole pour une année de simulation d'un même scénario.	111
Figure 3.13. Résultats des simulations des scénarios (une seule répétition présentée ici) de la région Picardie.	112
Figure 4.1. Location of (B) the two studied regions (grey: region Picardie; black: region Centre) and simulation support maps, i.e. field plans (A: region Centre; C: region Picardie).....	121
Figure 4.2. Example of one year-random WOSR allocation (3 repetitions of the reference situation for the sub-region Tardenois of Picardie region).	124
Figure 4.3. Scenario (all trends) simulation outputs (avrlmX: 1 and 4; Y _{loss} : 2 and 5; Pop _{size} : 3 and 6) against WOSR frequency (1, 2, 3) and RlmX-cultivars frequency (4, 5, 6)	127
Figure 4.4. Frequency of virulent pathotypes on RlmX-cultivars plotted against yield losses for reference situation and Trend A scenarios (1 repetition). Ref: Reference situation	128
Figure 4.5. Box-plots of scenario simulations for the three output variables (avrlmX, Y _{loss} , Pop _{size}) for the three trends (A, B, C) defined by stakeholders in the region Centre.....	128
Figure 4.6. Box-plots of scenario simulations for the three output variables (avrlmX, Y _{loss} , Pop _{size}) for the five trends (D, E, F, G, H) and concerned local situations ((T): Tardenois ; (S): Somme ; (O): Oise) defined by stakeholders in the region Picardie.	131
Figure 5.1. Location of (B) the two studied regions (grey: region Picardie; black: region Centre) and simulation support maps, i.e. field plans (A: region Picardie; C: region Centre) presenting one year-random WOSR allocation (3 repetitions) for the regions (A) Picardie and (B) Centre, with 29% of the areas cropped with WOSR. Black fields correspond to WOSR-crop.	147

Figure 5.2. Box-plot of the simulated final frequency of virulent pathotypes (avrlmX) in each repetition of each trend (see Table 5.1 for the description of the trends). The number after the letter name of the trend indicates the fraction of RlmX cultivar (e.g. A.50 means 50% of RlmX on trend A).	151
Figure 5.3. Determination coefficients of avrlmX of local indicators for the cropping practice displaying the best results (indicated in the legend of each graph) as a function of buffer size. Each graph corresponds to a trend, and sometimes the combination of a trend and a landscape WOSR frequency (see Table 5.1 1 for the trends' description). Significance thresholds were modified according to the number of scenarios tested in the trend.	153
Figure 5.4. Determination coefficients of the regression between final avrlmX frequency and local (0-500m) indicators computed with three different metrics on cultivar, tillage, fungicide application and autumnal nitrogen application on (A) RlmX source fields and (B) nRlmX source fields, as a function of the landscape fraction of WOSR cropped with RlmX-cultivars. Values for the x-axis are derived from Table 5.1. For clarity reasons, only significant indicators are presented ($p < 0.05$).....	155
Figure 5.5. Illustration de la règle de décision spatiale pour l'isolement des parcelles de colza ou du type variétal RlmX, pour une distance d'isolement de 0 mètre (i.e. interdiction des parcelles contigües)	159
Figure 5.6. Surfaces de variétés RlmX obtenues par l'application de la règle d'isolement spatial des parcelles de colza (3 répétitions par distance).....	161
Figure 5.7. Surfaces de variétés RlmX obtenues par l'application de la règle d'isolement spatial des variétés RlmX (3 répétitions par distance).....	161
Figure 5.8. Résultats des simulations pour les scénarios explorant les règles d'isolement spatial du colza : pertes de rendement dues au phoma en fonction de la taille de la population virulente	165
Figure 5.9. Résultats des simulations pour les scénarios explorant les règles d'isolement spatial du colza: pertes de rendement dues au phoma en fonction de la fréquence des individus virulents sur RlmX.....	167
Figure 5.10. Résultats des simulations pour les scénarios explorant les règles d'isolement spatial des variétés RlmX : pertes de rendement dues au phoma en fonction de la taille de la population virulente	169
Figure 5.11. Résultats des simulations pour les scénarios explorant les règles d'isolement spatial des variétés RlmX : pertes de rendement dues au phoma en fonction de la fréquence des individus virulents sur RlmX.....	171
Figure 6.1. Modèle mécaniste proposé pour améliorer la prévision de l'estimation de la sévérité de la maladie (note G2)	186

Liste des Tables

Table 0.1. Méthodes de lutte mobilisables en protection intégrée (source : Ferron et Deguine, 2005).	15
Table 1.1. Echelles spatiales et temporelles pour l'implémentation des méthodes de protection intégrée (source : adapté de Meynard <i>et al.</i> , 2003).	22
Table 1.2. Avantages et inconvénients des différents types de scénarios.	28
Table 1.3. Caractéristiques des scénarios narratif ou conçus à partir de modèles selon van Vliet <i>et al.</i> (2010). Avantage / Inconvénient (ou difficulté) / Caractéristique neutre	32
Table 1.4. Types de participation utilisée et de scénarios produits pour les principaux cas d'étude présentés.	37
Table 2.1. Forces évolutives impliquées dans l'adaptation des agents pathogènes incluses dans le modèle SIPPOM-WOSR (Sources: Burdon, 1993; Darwin et Wallace, 1858; Henry et Gouyon, 1999; McDonald et Linde, 2002; Thrall et Burdon, 2002)	60
Table 2.2. Principales caractéristiques des modes raster et vectoriel.	65
Table 2.3. Valeurs des paramètres utilisés pour calculer la durée d'humectation nécessaire d'une spore de <i>Leptosphaeria maculans</i> sur une feuille de colza d'hiver (source : Magarey <i>et al.</i> , 2005)	66
Table 2.4. Fréquences initiales des différents pathotypes pour les simulations	66
Table 2.5. Comparaison du nombre de spores émises entre les modes raster et vecteur	68
Table 2.6. Critères de choix des deux terrains d'étude pour l'application de la méthode participative de construction des scénarios.	71
Table 2.7. Principaux critères de choix des régions d'étude	72
Table 3.1. Main characteristics of reference scenario of the study area in "Centre region" (France), based on farmers' interviews about their cropping practices during the period 2004-2008.	81
Table 3.2. Type and number of stakeholders attending to the four steps of the method stakeholders were involved in.	88
Table 3.3. Main characteristics of the three trends collectively designed during the first workshop. WOSR: Winter Oilseed Rape; RlmX: specific resistance currently cropped; s.m-2: seeds per square meter	89
Table 3.4. Characteristics of the various scenarios constructed by participants of the second workshop WOSR: Winter Oilseed Rape; reference: values of reference scenario. Total number of scenarios per trend is obtained by multiplying the number of possibilities for each variable	91
Table 3.5. Types et nombre d'acteurs ayant participé aux différentes étapes de la méthode de construction de scénarios auxquelles les acteurs sont associés.	100
Table 3.6. Principales caractéristiques des trois situations de références construites avec les acteurs en région Picardie (les pratiques culturelles indiquées sont celles du colza).	107
Table 3.7. Caractéristiques des tendances pour le futur construites en région Picardie (les tendances sont appelées de D à H pour éviter la confusion avec les tendances A à C de la région Centre (Table 3.4)).	108
Table 3.8. Tendances et caractéristiques des scénarios pour la région Picardie (sous régions T : Tardenois ; S : Somme ; O : Oise).	110
Table 4.1. Main characteristics of reference situations for the two studied regions (for the Centre region: adapted from Hossard <i>et al.</i> , submitted).	121
Table 4.2. Trend and scenario characteristics for model inputs for the Centre region (adapted from Hossard <i>et al.</i> , submitted).	123
Table 4.3. Trend and scenario characteristics for model inputs for the Picardie region.	125
Table 4.4. Effects of cropping system practices (including frequency of WOSR) and weather on the size of pathogen population (Pop_{size}), the yield losses (Y_{loss}) and on the frequency of virulent	

pathotypes on RlmX-cultivars (avrlmX) for the trends identified by stakeholders in the region Centre: results of linear model (1).	129
Table 4.5. Effects of cropping system practices (including frequency of WOSR) and weather on the size of pathogen population (Pop_{size}) for the four trends identified in the Picardie region.....	132
Table 4.6. Effects of cropping system practices (including frequency of WOSR) and weather on the yield losses (Y_{loss}) for the four trends identified by stakeholders in the Picardie region	132
Table 4.7. Effects of cropping system practices (including frequency of WOSR) and weather frequency of virulent pathotypes on RlmX-cultivars (avrlmX) for the trends D, E and H.	134
Table 5.1. Characteristics of the cropping systems scenarios, defined at the scale of the whole landscape. Scenarios were devised by stakeholders according to the expected impact of changes in the agricultural context (trends A to H), different hypotheses concerning the use of resistant cultivars (the numeral in the row names indicates the percentage of RlmX cultivars) and, in some cases, the type of soil (letters S, T or O in the row names). Several figures in one cell indicate that several scenarios were tested.	149
Table 5.2. Subsets of source fields (year y-1) and metrics used to describe the local landscape around target fields (year y), as a function of the considered cropping practices. Σ indicates a sum, Π indicates a mean, max indicates the maximum, y, j, i indicate summation (or average) over years (from 2 to 5), target fields and source fields, respectively, s_i indicates the acreage of field i, d_{ij} indicates the distance between fields i and j. The X indicates that a particular metric was used with the particular subset of source fields to compute an indicator variable.	151
Table 5.3. Rappel des caractéristiques des trois situations de références construites avec les acteurs en région Picardie (les pratiques culturelles indiquées sont celles du colza).	159
Table 5.4. Gestion des résidus différenciée en fonction des types variétaux utilisée dans les simulations	160
Table 5.5. Surfaces totales de colza et de variétés RlmX, calculées à l'échelle de la simulation (somme sur les 5 années), associées aux scénarios explorant l'isolement des parcelles de colza.	163
Table 5.6. Surfaces de variétés RlmX, calculées à l'échelle de la simulation (somme sur les 5 années), associées aux scénarios explorant l'isolement des variétés RlmX	163
Table 6.1. Caractéristiques de la méthode utilisée et des scénarios construits dans la thèse	174
Table 6.2. Evaluation de la méthode testée dans cette étude vis-à-vis des critères définis par Rauschmayer et Wittmer (2006).....	178
Table 6.3. Synthèse des ressources incluses dans le modèle SIPPOM-WOSR et/ou identifiées lors des réunions collectives de construction des schémas ARDI en régions Centre et/ou Picardie.....	182
Table 6.1. Synthèse des principaux avantages et des principales limites de la méthode de construction des scénarios appliquée dans cette étude.....	187
Table 6.2. Surfaces de colza dans les différents départements des régions Centre et Picardie	190

Liste des Equations

Equation 1.1. Calcul de la note G2	49
Equation 2.1. Calcul de l'indice de sévérité (G2) pour chaque parcelle semée en colza durant l'année culturale simulée.	60
Equation 2.2. Calcul des pertes de rendement relatives associées au phoma. Y_{loss} correspond aux pertes de rendement relatives, DI à l'indice de sévérité de la maladie (G2) (source : Aubertot <i>et al.</i> , 2004b)	60
Equation 2.3. Modèle d'infection de Magarey <i>et al.</i> (2005) permettant de calculer la durée d'humidité nécessaire à l'infection, en fonction de la température.	66
Equation 2.4. Fonction de réponse à la température de Magarey <i>et al.</i> (2005) pour le calcul de la durée d'humidité nécessaire à l'infection.	66

Liste des Encadrés

Encadré 0.1. Méthodes pour la conception de systèmes agricoles	15
Encadré 1.1. Définition des éléments composant un scénario selon Alcamo et Henrichs (2008).....	24
Encadré 1.2. Typologie des méthodes participatives (source: van Asselt et Rijkens-Klomp, 2002).....	30
Encadré 1.3. Le concept d'évaluation intégrée, selon Rotmans et van Asselt (1996)	32
Encadré 1.4. Méthodes de construction participatives de modèles, d'après Voinov et Bousquet (2010)	35
Encadré 3.1. Matériel et méthodes utilisés pour la présentation et l'application de la méthode de construction de scénarios	76
Encadré 3.2. La Directive Nitrates et ses conséquences en termes de gestion des repousses (et résidus) de colza en zones vulnérables.....	103
Encadré 4.1. Matériel et méthodes utilisées pour le Chapitre 4.....	118
Encadré 5.1. Matériel et méthodes utilisés pour le Chapitre 5	143

Introduction générale

A l'échelle mondiale, la production agricole des principales espèces cultivées a doublé entre les années 1960 et 2010 (Godfray *et al.*, 2010), en lien avec une expansion des terres agricoles, une simplification des rotations, l'utilisation de variétés de plus en plus productives, une forte mécanisation et une utilisation intensive d'intrants (Foley *et al.*, 2005 ; Matson *et al.*, 1997 ; Stoate *et al.*, 2001). Cette intensification agricole, liée à une demande alimentaire croissante, a permis un net accroissement de la productivité agricole par unité de surface (Stoate *et al.*, 2009). Elle s'est également accompagnée d'une simplification de la structure des paysages agricoles (Altieri, 1999 ; Mignolet *et al.*, 2007 ; Stoate *et al.*, 2001 ; Stoate *et al.*, 2009) liée à une concentration et une spécialisation régionale des types de production (Bowler, 1986). Cette agriculture productiviste, reposant sur une utilisation massive d'intrants chimiques, a engendré des effets négatifs à différentes échelles sur les (agro-) écosystèmes et la santé humaine (Horrihan *et al.*, 2002 ; Matson *et al.*, 1997 ; Tilman *et al.*, 2002 ; Vitousek *et al.*, 1997). Pour répondre aux enjeux environnementaux induits par l'agriculture moderne et limiter ses impacts, des modes de production plus durables sont promus par différentes politiques agricoles, notamment pour réduire l'utilisation de pesticides (Mesures Agri-Environnementales de la Politique Agricole Commune, Directive européenne sur l'utilisation des pesticides, Plan Ecophyto 2018). En France, ces différentes politiques concernent principalement l'échelle de la parcelle (au sein de l'exploitation agricole), alors que de nombreux enjeux environnementaux se jouent à une échelle supraparcellaire, comme par exemple la pollution nitrique des eaux (Beaujouan *et al.*, 2001). Pour répondre à ce type d'enjeu, une approche à l'échelle du paysage, où les exploitations agricoles adapteraient leurs pratiques de manière concertée pour répondre à un objectif commun, est nécessaire (Souchère *et al.*, 2009 ; Whittingham, 2007). Cette coordination collective pourrait être favorisée par le conditionnement des aides individuelles au maintien d'un contexte paysager adéquat, permettant de gérer l'enjeu local considéré (Moreira *et al.*, 2005).

Un de ces enjeux concerne la gestion des bioagresseurs¹. La simplification des paysages, en termes d'espèces cultivées, a rendu les agrosystèmes plus sensibles aux bioagresseurs (Meehan *et al.*, 2011). Or, pour limiter les risques de pertes de rendement induites par ces derniers, les moyens de lutte les plus fréquents actuellement sont les pesticides, dont l'utilisation, non durable, est de plus en plus remise en cause (Aubertot *et al.* 2005). A l'échelle du paysage, la nature des cultures, des pratiques (dont les variétés) et leur localisation ont une incidence sur la pression parasitaire (Papaïx *et al.*, 2011 ; Rusch *et al.*, 2011 ; Skelsey *et al.*, 2010). Modifier la localisation des cultures et des variétés au sein du parcellaire agricole modifie la localisation des habitats des bioagresseurs et influence ainsi leurs dynamiques (Rusch *et al.*, 2011 ; Skelsey *et al.*, 2011). Par ailleurs, les évolutions de nombreux bioagresseurs s'inscrivent à une échelle pluriannuelle : l'occurrence et l'intensité d'une épidémie, une année donnée, vont influencer l'épidémie de l'année suivante. Ainsi, l'organisation spatiale des systèmes de culture influence les dynamiques des bioagresseurs. Il semble donc de plus en plus nécessaire de raisonner l'organisation dans le temps et dans l'espace des systèmes de culture pour réduire la vulnérabilité des paysages agricoles aux épidémies (Skelsey *et al.*, 2010), et ainsi contribuer à réduire l'usage des produits phytosanitaires.

¹ Bioagresseur : organisme pouvant induire des pertes de récolte directes ou indirectes (pertes de rendement en quantité et/ou en qualité) ou un coût additionnel de récolte et/ou de tri (ex. adventices, insectes, champignons pathogènes, etc.) (Zadoks, 1993)

Encadré 0.1. Méthodes pour la conception de systèmes agricoles

(1) **Le diagnostic agronomique** : il repose sur des mesures au champ et des enquêtes en exploitations agricoles et permet d'appréhender et d'évaluer des itinéraires techniques (Doré *et al.*, 1997, 2008 ; Valentin-Morison et Meynard, 2008).

(2) **La conception à partir de dires d'experts** : ce sont des méthodes permettant d'impliquer des experts dans un processus de conception (ex. Debaeke *et al.*, 2009 ; Lançon *et al.*, 2007). Aussi appelée prototypage, cette méthode inclue cinq étapes : (1) hiérarchiser les objectifs de la conception, (2) établir des méthodes agricoles multi-objectifs permettant d'atteindre ces objectifs, (3) concevoir le prototype avec les experts, (4) expérimenter et améliorer le prototype et (5) diffuser le prototype (Vereijken, 1997).

(3) **Les approches *in silico* (approches modélisatrices)** : en se basant sur l'étude d'une large gamme de systèmes agricoles, appréhendés par la modélisation et la simulation, ces approches permettent d'identifier rapidement de nouveaux systèmes permettant de répondre à un (ou plusieurs) enjeu(x) particulier(s) (ex. Bergez *et al.*, 2011 ; Hengsdijk et van Ittersum, 2003 ; Loyce et Wery, 2006 ; Romera *et al.*, 2004)

Méthode de lutte	Principe
Lutte chimique	Utilisation de pesticides
Lutte biologique	Utilisation d'organismes vivants pour limiter les populations ² de bioagresseurs
Lutte physique	Utilisation de techniques dont les moyens d'action sont physiques (thermique, mécanique) pour limiter l'impact des bioagresseurs
Contrôle génétique	Utilisation de variétés résistantes pour limiter les impacts des bioagresseurs
Lutte culturale	Utilisation de techniques agronomiques pour limiter le développement des bioagresseurs (rotation, dates/densités de semis, introduction de cultures intermédiaires)

Table 0.1. Méthodes de lutte mobilisables en protection intégrée (source : Ferron et Deguine, 2005)

² Une population est définie par l'ensemble des individus de la même espèce, considéré dans des limites spatiales définies (Ferron et Deguine, 2005).

Imaginer des stratégies de gestion d'un bioagresseur requiert d'identifier les différents leviers mobilisables pour limiter son développement ou ses effets sur les cultures. La protection intégrée des cultures a été proposée pour lutter contre les bioagresseurs en utilisant des méthodes économiquement, écologiquement et toxicologiquement viables (El Titi *et al.*, 1993). Elle est basée sur différents types de leviers : la lutte chimique, biologique, physique, culturale et génétique (OILB/SROP, 1973 ; Table 0.1). Dans une perspective d'agriculture durable, la combinaison de ces méthodes, dans le temps et dans l'espace, peut permettre de diminuer l'utilisation des pesticides (Meynard *et al.*, 2003). En effet, 67% des pesticides utilisés en France visent à lutter contre les maladies en grandes cultures (Butault *et al.*, 2010). Ces différentes méthodes sont donc mobilisables pour atteindre l'objectif de réduction de l'utilisation de 50% des pesticides, si possible d'ici 2018, fixé par le Grenelle de l'Environnement en 2007. En grandes cultures, il est possible de mobiliser et de combiner dans le temps et dans l'espace des leviers agronomiques efficaces, comme la résistance génétique (Loyce *et al.*, 2008) et la lutte culturale (Aubertot *et al.*, 2004a ; Aubertot *et al.*, 2006b).

Plusieurs approches peuvent être utilisées pour concevoir une organisation spatiale de systèmes de culture, mobilisant ces différents leviers, pour maîtriser un bioagresseur. Cette conception requiert d'imaginer les nouveaux systèmes de culture possibles et efficaces en même temps que de réfléchir à leur organisation dans l'espace. Loyce et Wery (2006) distinguent trois méthodes principales de conception de systèmes de culture (Encadré 0.1) : la conception à partir d'un diagnostic agronomique, la conception à partir de dires d'experts et la conception *in silico* (par modélisation). Les approches *in silico* permettent généralement d'étudier une gamme plus large de systèmes par la simulation. Ces approches permettent l'accès à des variables d'évaluation non accessibles facilement à la mesure (physique). Elles permettent également de conduire des expérimentations virtuelles qui auraient été impossibles à mener dans le monde réel (Legg, 2004), du fait de l'échelle temporelle et/ou spatiale des processus mis en jeu, ou d'un blocage sociétal face à des innovations jugées non faisables *a priori*, ou non acceptables. Dans le cadre de la gestion d'un bioagresseur dont les dynamiques nécessitent la prise en compte d'échelles supérieures à l'année et à la parcelle, la modélisation apparaît comme un outil nécessaire (Skelsey *et al.*, 2010). En effet, tester expérimentalement des stratégies de gestion des pratiques à des échelles pluri-parcellaires est problématique (Hijmans et van Ittersum, 1996 ; Skelsey *et al.*, 2010). Le recours à la modélisation permet de tester les effets de pratiques culturales pluriannuelles localisées sur la gestion d'un problème dont les processus requièrent la prise en compte d'échelles supérieures à l'année et à la parcelle (Tricault *et al.*, 2011). Ainsi, la modélisation spatialement explicite permet de représenter l'effet de l'agencement spatio-temporel du choix et de la distribution des variétés et des systèmes de culture dans lesquels elles sont utilisées sur le bioagresseur étudié (Skelsey *et al.*, 2010).

L'implication des porteurs d'enjeux³ dans les processus décisionnels pour la gestion des ressources est considérée comme un moyen efficace pour définir des décisions/solutions plus réalistes et durables, du fait de la prise en compte d'informations plus complètes et de l'implication des personnes concernées dans les décisions proposées (Reed, 2008). Ces solutions, construites localement, sont généralement plus adaptées que des solutions conçues de manière plus générique (Brandenbourg *et al.*, 1995), en particulier quand les différents porteurs d'enjeux ont des demandes/stratégies contradictoires (Anderson *et al.*, 1998). Impliquer les porteurs d'enjeux agricoles peut être utile pour identifier les leviers efficaces mobilisables localement et concevoir des organisations spatio-temporelles des

³ Un porteur d'enjeu (*stakeholder*) est défini comme « un individu ou un groupe influencé par et pouvant influencer (directement ou indirectement) le sujet d'intérêt (Engi et Glick, 1995, in Glick (2000)). Un "porteur d'enjeu" est un terme relatif, il doit être défini par rapport à la thématique étudiée (Glick, 2000). Grimble et Wellard (1997) différencient les acteurs « directs » des acteurs « indirects » selon qu'ils affectent ou sont affectés, i.e. qu'ils ont une influence ou sont influencés par les décisions liées à la gestion de la ressource considérée (Leenhardt *et al.*, 2012).

systèmes de culture. La gestion spatiale des systèmes de culture, en vue d'atteindre des objectifs collectifs, peut en effet nécessiter une coordination, à l'échelle d'un territoire, entre des porteurs d'enjeux divers. C'est le cas, par exemple, de la réduction des risques d'érosion (Joannon *et al.*, 2006 ; Souchère *et al.*, 2010), de la gestion de l'eau dans des bassins versants (Becu *et al.*, 2008 ; Hare *et al.*, 2006), ou des moyens de garantir des cultures non OGM⁴ dans une région productrice d'OGM (Viaud *et al.*, 2008). Impliquer les acteurs dans la réflexion autour de la gestion spatio-temporelle des systèmes de culture peut permettre de prendre en compte leurs capacités d'adaptation (Lorenzoni *et al.*, 2000), leurs marges de manœuvre et leurs contraintes (Joannon *et al.*, 2006). Cela peut également encourager le dialogue et le partage des connaissances (Patel *et al.*, 2007) et permettre aux porteurs d'enjeux agricoles d'être acteurs de la construction de solutions. Cette implication pourrait faciliter leur mise en œuvre (Cerf et Meynard, 2006), en réduisant les conflits qui pourraient surgir pendant la phase d'implémentation (Thomas, 1990).

Concevoir une organisation spatio-temporelle locale des systèmes de culture pour gérer un bioagresseur requiert de réfléchir aux changements futurs, possibles et/ou souhaitables des pratiques agricoles. Ces futurs locaux dépendent de changements de contexte (politique, réglementaire, social, climatique, économique) à différentes échelles (locale, régionale, nationale ou internationale). L'étendue de ces changements, ainsi que leurs possibles impacts locaux et globaux sur les paysages et sur l'environnement, restent largement méconnus (Verburg *et al.*, 2006) et peu prédictibles. Pour « étudier le futur », une approche de construction de scénarios peut être utilisée (Alcamo, 2008a). Cet outil est couramment employé pour évaluer les changements d'usage des sols en fonction d'hypothèses d'évolution du contexte économique, environnemental ou institutionnel (Ewert *et al.*, 2005 ; Rotmans *et al.*, 2000). Van Notten (2005) en propose la définition suivante : les scénarios sont « des descriptions logiques et cohérentes de situations futures hypothétiques qui reflètent des points de vue différents sur des évolutions passées, présentes et futures et qui peuvent servir de fondement à des actions ». Ils nécessitent d'identifier et de prendre en compte les leviers clés des futurs changements (Dockerty *et al.*, 2006 ; Valkering *et al.*, 2011). L'élaboration des futurs et des scénarios par des porteurs d'enjeux locaux peut permettre d'identifier des actions à court terme et des options politiques/réglementaires qui pourraient permettre de faire face à ces changements (Patel *et al.*, 2007). Le rôle des scénarios est d'aider les gestionnaires *ad hoc* à identifier, considérer et réfléchir les incertitudes auxquelles ils pourraient faire face (Varum et Melo, 2009), permettant ainsi de produire de meilleures décisions (Maack, 2001). En imaginant plusieurs trajectoires de changement vers des futurs alternatifs et en considérant de manière globale le système, les scénarios participent à réduire les risques inhérents à la prise de décision (Mahmoud *et al.*, 2011). Ils peuvent ainsi contribuer à définir des options permettant de répondre à un enjeu local, comme par exemple les bioagresseurs.

L'objectif de ce travail de thèse est de construire des scénarios spatialisés des systèmes de culture pour gérer un bioagresseur, en impliquant des acteurs dans la construction de scénarios évalués ensuite à l'aide d'un modèle numérique. Le bioagresseur étudié est le phoma du colza (*Leptosphaeria maculans*). Le premier chapitre présente une analyse bibliographique centrée sur les méthodes d'élaboration et d'analyse des scénarios et une synthèse des connaissances sur le phoma du colza. Il se poursuit par la présentation des questions de recherche traitées dans ce travail. Le deuxième chapitre présente les régions d'étude, le modèle utilisé et les méthodes statistiques mobilisées dans ce travail. Le troisième chapitre décrit la démarche de construction des scénarios conçue et son application. Les quatrième et cinquième chapitres portent sur les analyses de ces scénarios. Enfin, le sixième chapitre discute la démarche et l'ensemble des résultats de la thèse et conclut ce travail.

⁴ OGM : Organisme Génétiquement Modifié

Chapitre 1. Etat de l'art et problématique

1. Les leviers de gestion des bioagresseurs en grandes cultures

Pour limiter le développement des bioagresseurs et réduire leurs effets sur les cultures, deux leviers principaux sont mobilisables en grandes cultures : le levier génétique et le levier agronomique (Table 0.1). Cette partie présente le fonctionnement de ces deux leviers et de leur combinaison, ainsi que leurs impacts sur la gestion des bioagresseurs⁵.

1.1. Le levier génétique

La résistance génétique recouvre un ensemble de processus qui vont permettre à la plante de limiter ou d'arrêter le développement d'un agent pathogène. Ceci se manifeste dès la phase de l'infection et réduit ensuite le développement de l'agent pathogène sur la plante. L'effet de la résistance est mesurable au niveau de l'expression des symptômes ou du développement de l'épidémie (Deadman, 2006). La génétique de la résistance des plantes face aux agressions des agents pathogènes a été formalisée par Van der Planck (1963), avec deux concepts explicatifs du pouvoir pathogène :

- La virulence : faculté du parasite d'attaquer un hôte (composante qualitative)
- L'agressivité : quantité de maladie que le parasite peut induire (composante quantitative, non spécifique).

A ces deux facteurs sont associés deux comportements chez l'hôte : (i) la résistance qualitative (aussi appelée majeure ou spécifique) qui s'oppose à la virulence ; (ii) la résistance quantitative (ou partielle) qui s'oppose à l'agressivité.

1.1.1. La résistance spécifique

La résistance spécifique correspond à une interaction gène pour gène (Flor, 1971) entre le bioagresseur et son hôte (la plante) : elle est basée sur une reconnaissance spécifique entre la plante et l'agent pathogène qui déclenche une cascade de réactions de défense et empêche ainsi l'infection de se développer. Cette résistance est de support monogénique et son expression est de type "tout ou rien", soit nulle, soit totale : l'infection de la plante est complètement empêchée dès lors que la plante possède le gène de résistance (noté R) correspondant au gène d'avirulence⁶ du bioagresseur (noté Avr) (). La relation entre la plante et son hôte est alors dite « incompatible » : la croissance du parasite et la colonisation de la plante seront arrêtées très tôt lors du processus d'infection, en particulier par le déclenchement d'une mort cellulaire très localisée, et il n'y aura donc ni développement épidémique ni dommage⁷ causé à la culture (Lepoivre, 2003).

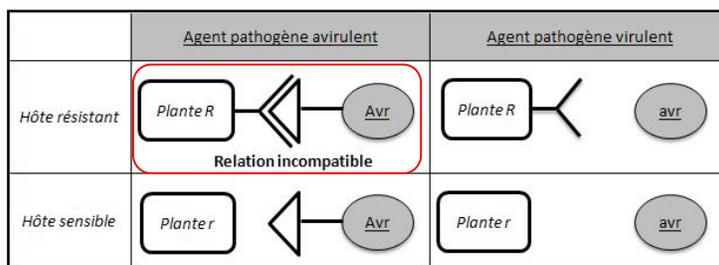


Figure 1.1. Fonctionnement de la résistance spécifique (adapté de Flor, 1971).

L'encadré rouge souligne le cas où la plante possède un gène de résistance R et l'agent pathogène le gène d'avirulence correspondant Avr. C'est l'unique cas où la résistance spécifique s'exprime et il n'y a pas de développement de la maladie.

⁵ Cette partie est principalement basée sur un article publié dans la revue Innovations Agronomiques (Hossard L., Lannou C., Papaix J., Monod H., Lô-Pelzer E., Souchère V., Jeuffroy M.H., 2011. Quel déploiement spatio-temporel des variétés et des itinéraires techniques pour accroître la durabilité des résistances variétales ? Innovations Agronomiques, 8, 15-33).

⁶ Un gène d'avirulence d'un agent pathogène est un gène codant pour une protéine spécifiquement « reconnue » par la plante hôte possédant le gène de résistance correspondant, quel que soit son rôle ou sa fonction dans la pathogénéicité de l'agent (Rouxel et Balesdent, 2010).

⁷ Dommage : réduction de la quantité et/ou de la qualité des produits récoltés due aux bioagresseurs (Savary *et al.*, 2006).

1.1.2. La résistance quantitative

Cette résistance à effet partiel est basée sur un support génétique polygénique dans la grande majorité des cas. Elle est gouvernée par plusieurs gènes dont les effets sont cumulatifs (Schiff *et al.*, 2001) et que l'on décrit en général sous la forme de QTL (Quantitative Trait Loci), chaque QTL étant supposé contenir un gène déterminant un effet particulier sur le développement de l'agent pathogène (Lindhout, 2002).

Si une variété est uniquement porteuse de résistance quantitative (absence de gène de résistance spécifique), tous les individus pathogènes ont la capacité de l'infecter, mais la résistance quantitative permettra de diminuer leur agressivité. Cela se traduira :

- Chez l'agent pathogène : par une perte de performance sur une ou plusieurs composantes du cycle de développement, efficacité d'infection, période de latence⁸, sporulation.
- Chez la plante : par une diminution de la quantité de symptômes.

Quelle que soit la composante du cycle du parasite affectée, la résistance quantitative limitera donc les dommages provoqués par l'agent pathogène sur la plante.

1.1.3. Durabilité des résistances et échelles de gestion

La durabilité de la résistance a été définie, de manière générale, comme la durée entre l'introduction dans le paysage d'une variété portant le gène de résistance considéré, et le moment où la fréquence des pathotypes⁹ virulents sur ce gène atteint un seuil prédéfini (van den Bosch et Gilligan, 2003). Par exemple, van den Bosch et Gilligan (2003) fixent, de manière arbitraire, le seuil de fréquence d'individus virulents à 90% de la population. De nombreuses études ne fixent pas explicitement ce seuil, elles caractérisent la durabilité par comparaison entre plusieurs variétés/gènes de résistance (ex. Harrison, 2002). Le contournement d'une résistance correspond à la perte de l'efficacité de cette résistance. Suite à l'adaptation des populations pathogènes au gène de résistance rencontré dans les plantes, les individus virulents pour cette résistance vont devenir plus fréquents (évolution de la structure génétique¹⁰ des populations due aux forces de sélection) : le gène de résistance des plantes devient alors inefficace, car la population pathogène devient majoritairement virulente.

La durabilité des résistances diffère selon le type de résistance : (i) les résistances spécifiques, bien que localement et transitoirement très efficaces (McDonald et Linde, 2002), sont peu durables et peuvent être rapidement contournées (Sprague *et al.*, 2006) du fait de l'adaptation des populations pathogènes, en particulier dans le cas de l'utilisation, sur une large portion du territoire, de variétés porteuses du même gène de résistance (Rouxel *et al.*, 2003) ; (ii) les résistances quantitatives sont considérées comme plus durables, du fait de la plus grande difficulté pour le pathogène à s'adapter à plusieurs facteurs de résistance¹¹ ; (iii) la combinaison de résistances spécifique et quantitative au sein d'une même variété permet d'augmenter la durée d'efficacité du gène de résistance spécifique (Brun *et al.*, 2010).

Actuellement, les variétés porteuses de résistances spécifiques sont les plus utilisées en grandes cultures. Leur disponibilité est à mettre en lien avec la relative facilité à manipuler ce type de résistance en sélection, la résistance quantitative étant nettement plus délicate à sélectionner du fait de

⁸ Période entre l'infection et l'émission de nouvelles spores par l'agent pathogène.

⁹ Le pathotype d'un agent pathogène est défini en fonction de l'ensemble des allèles de virulence ou d'avirulence déterminés sur une gamme différentielle d'hôtes donnée.

¹⁰ La structure génétique est définie par la quantité et la distribution de la diversité à l'intérieur d'une population et entre les populations (McDonald and Linde, 2002).

¹¹ Facteur(s) de résistance : Partie(s) du génome codant pour la résistance, i.e. gène (allèle) pour la résistance spécifique ; QTL (Quantitative Trait Loci) pour la résistance quantitative.

la faible héritabilité des facteurs génétiques qui en sont responsables. La diminution du nombre de variétés cultivées (Goffaux *et al.*, 2011) et la préférence des sélectionneurs pour les résistances de type spécifique (jusqu'à une période récente) favorisent ces situations, où un faible nombre de variétés et de gènes de résistance spécifique se côtoient à l'échelle du paysage et dans le temps. Cette forte homogénéité à l'échelle d'une petite région agricole augmente les risques de contournement des résistances spécifiques : les populations parasites s'adaptent rapidement au gène de résistance largement déployé et provoquent des épidémies, dont la récurrence d'une année sur l'autre dépendra des caractéristiques du pathosystème considéré, notamment du cycle de l'agent pathogène et de ses capacités de dispersion. L'adaptation des populations parasites dépend ainsi, outre ses propres capacités d'adaptation, de l'utilisation spatiale (paysage) et temporelle (rotation) du gène de résistance spécifique (McDonald et Linde, 2002). Elle dépend également des moyens de lutte contre les maladies mis en place par les agriculteurs (chimique et agronomique). En effet, dans certains pathosystèmes, les pratiques culturales peuvent influencer le cycle du parasite, d'un point de vue quantitatif (quantité de lésions ou de propagules) et qualitatif (fréquences des pathotypes), et de ce fait affecter la durée d'efficacité des résistances (exemple du labour pour le pathosystème phoma du colza).

Johnson (1981 ; 1984) définit trois critères importants pour considérer qu'une résistance est durable (i.e. non contournée) : cette résistance doit être utilisée (i) sur de larges surfaces, (ii) pendant une durée importante, et (iii) dans des conditions environnementales favorables à la maladie. Du fait de la définition de la durabilité, les échelles pluriannuelle et supraparcellaire doivent être considérées pour certaines maladies, en lien avec les capacités de dispersion (échelle spatiale) et de survie (échelle de temps) des agents pathogènes. Pour améliorer à la fois l'efficacité et la durabilité des résistances, il est nécessaire de réintroduire de la diversité génétique dans les agroécosystèmes. La diversification des résistances peut se concevoir à différentes échelles, en deçà et au-delà de la parcelle : (i) en combinant des résistances (spécifiques et/ou quantitatives) à l'échelle de la plante ; (ii) en diversifiant les résistances

utilisées à l'échelle du champ (associations végétales) ; (iii) en diversifiant les résistances utilisées à l'échelle de la rotation¹² ; (iv) en diversifiant et en raisonnant les résistances à l'échelle de la région et de la rotation. Le déploiement des gènes de résistance devra prendre en compte les capacités de dispersion des pathogènes considérés.

La gestion spatio-temporelle des résistances variétales peut affecter les populations pathogènes de deux manières différentes : (i) en limitant la taille des populations pathogènes et (ii) en limitant la pression de sélection exercée sur ces populations (concept de Gestion Intégrée de l'Avirulence ; Aubertot *et al.*, 2006b). L'association de méthodes de lutte intégrée permet d'agir sur ces deux points (Table 0.1).

1.2. Le levier agronomique

Les pratiques culturales peuvent réduire les risques d'occurrence et de développement des épidémies dans les cultures (Meynard *et al.*, 2003). En effet, une épidémie se développe en fonction des interactions entre les plantes et ses agents pathogènes, qui dépendent de facteurs environnementaux et des pratiques culturales (Tixier *et al.*, 2006). Il est ainsi possible de prolonger la durée d'efficacité des résistances en utilisant le levier agronomique (Aubertot *et al.*, 2006b). Alors que l'utilisation de fongicides vise à réduire directement la taille de la population pathogène en interrompant son cycle biologique, les pratiques culturales visant à la protection intégrée des cultures peuvent agir sur l'ensemble du cycle de l'agent pathogène (Meynard *et al.*, 2003) et ainsi participer à un système de protection durable.

¹² Le délai de retour d'une résistance variétale au sein de la rotation devra prendre en compte les capacités de survie des pathogènes considérés (exemple de la rhizomanie de la betterave, Gilligan *et al.*, 2007).

D'après Meynard *et al.* (2003), les systèmes de culture vont avoir un effet sur : (i) la taille de l'inoculum primaire (source d'agents pathogènes) et sa localisation ; (ii) le développement et la propagation de l'épidémie ; (iii) la coordination des cycles des plantes et de leurs agents pathogènes.

Le choix des pratiques culturales, en plus du choix variétal déjà évoqué, va ainsi avoir un effet sur le cycle du parasite et donc sur le contrôle de la maladie d'un point de vue quantitatif (quantité de lésions ou de propagules) et/ou qualitatif (fréquences des pathotypes), et ainsi pouvoir prolonger la durée d'efficacité des résistances. Les pratiques vont en effet affecter la taille et la structure des populations pathogènes (West *et al.*, 2006). Les pratiques sont ainsi susceptibles de modifier la dynamique des populations pathogènes virulentes émergentes, en accentuant ou en modérant les forces évolutives à chaque étape du cycle épidémique. Ainsi, lorsqu'un gène de résistance est contourné, les pathotypes virulents se propageront moins si les pratiques diminuent globalement la capacité de multiplication du parasite.

1.3. Gérer le levier génétique par le levier agronomique

L'implémentation des méthodes de protection intégrée s'inscrit dans le temps et dans l'espace (Table 1.1). Ces méthodes peuvent être mobilisées à trois échelles temporelles imbriquées (Meynard *et al.*, 2003) : intra-cycle cultural, à l'échelle du cycle cultural entier et à l'échelle pluriannuelle. Elles peuvent également être utilisées à trois échelles spatiales différentes : la parcelle, l'îlot et la région (Table 1.1). Le déploiement spatio-temporel des variétés et des pratiques associées va ainsi influencer le cycle de l'agent pathogène au niveau qualitatif (sélection des pathotypes virulents) et quantitatif (production d'inoculum primaire sur les résidus de culture).

Temps \Espace	Parcelle (1-10 ha)	Îlot (10 ² -10 ³ h)	Région (10 ⁴ -10 ⁵ ha)
Ajustement tactique (inférieur à l'année)	Ajustement des traitements en fonction de la prédiction des dommages	Choix des « parcelles témoins » pour l'identification des risques	Prédiction des risques parasitaires en fonction du climat
Stratégie de campagne (échelle de la culture, année)	Diminution des épidémies (et dommages ultérieurs) par le choix des variétés et des pratiques	Contrôle des contaminations à courte distance et diversification des sources de résistance génétique	Diversification des sources de résistance génétique
Stratégie à long terme (échelle du SdC, pluriannuel)	Diminution de la production d'inoculum primaire par le choix des SdC	Contrôle des contaminations à courte distance	Coordination des méthodes de protection pour préserver la durabilité des résistances

Table 1.1. Echelles spatiales et temporelles pour l'implémentation des méthodes de protection intégrée (source : adapté de Meynard *et al.*, 2003).

SdC : Système de culture

Conclusion partielle

La simplification et l'intensification des paysages et des systèmes de culture ont rendu les agrosystèmes plus sensibles aux bioagresseurs. Dans un contexte fortement marqué par des demandes sociétales et politiques pour des modes de production plus durables, des moyens de lutte alternatifs à la lutte chimique peuvent être utilisés. La lutte génétique et la lutte agronomique peuvent être mobilisées pour réduire l'utilisation de pesticides et, de manière plus générale, les impacts environnementaux de l'activité agricole. La combinaison de ces moyens de lutte, en vue d'atteindre une meilleure efficacité, peut nécessiter de repenser les systèmes de culture à une échelle supérieure à la parcelle-année, de manière à appréhender les processus de développement et de propagation des épidémies.

Encadré 1.1. Définition des éléments composant un scénario selon Alcamo et Henrichs (2008)

(1) représentation de la situation initiale : définition de l'initialisation du scénario basée sur la situation actuelle (Alcamo et Henrichs, 2008). Elle correspond à la situation actuelle, sans intervention ou modification contextuelle (van Notten *et al.*, 2003). Dans le cas de scénarios quantitatifs, la situation initiale fait généralement référence à l'année la plus récente pour laquelle les informations nécessaires sont disponibles (Alcamo et Henrichs, 2008) ;

(2) description des facteurs de changement : description des principaux déterminants qui vont influencer les développements futurs du système décrit dans le scénario (Alcamo et Henrichs, 2008). Ces facteurs peuvent varier dans le temps et s'appliquer à de grands espaces (Rounsevell *et al.*, 2006). Ces facteurs peuvent être internes ou externes au système (i.e. variables endogènes et exogènes) (Zurek *et al.*, 2007) ;

(3) description des changements : description (pas à pas) de l'évolution du système sous l'influence des facteurs de changements et de leurs interactions (Alcamo et Henrichs, 2008). Cette évolution peut être linéaire ou marquée par des ruptures (discontinuités) (van Notten *et al.*, 2005) ;

(4) description d'une image du futur : description de l'état futur du système, résultant des hypothèses réalisées sur les facteurs de changements, leurs interactions et leurs conséquences sur le changement. Il est associé à un horizon temporel (Alcamo et Henrichs, 2008).

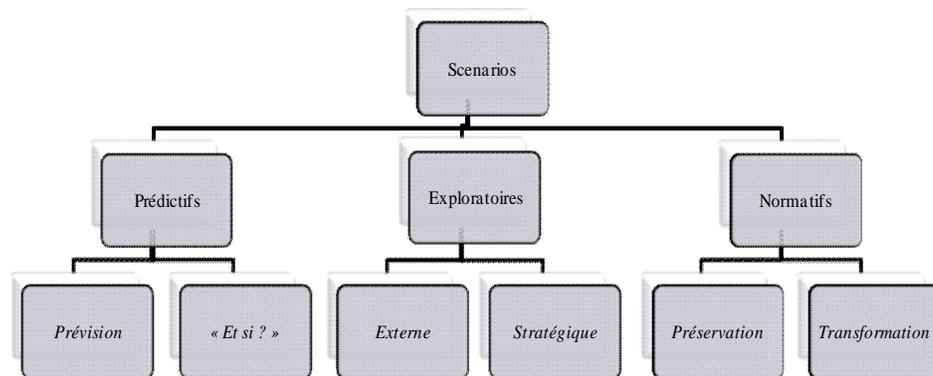


Figure 1.2. Typologie des scénarios selon Börjeson *et al.* (2006).

2. Comment concevoir des scénarios d'organisation spatiale des systèmes de culture ?

Pour concevoir de nouveaux systèmes de culture, trois grands types de méthodes ont été identifiés par Loyce et Wéry (2006) (Encadré 0.1). Parmi elles, le diagnostic agronomique ne permet pas d'évaluer les performances d'alternatives aux systèmes diagnostiqués, avant de les mettre en œuvre, dans une diversité de contextes productifs agricoles (Martin, 2009). Nous nous focaliserons donc, dans cette partie, sur les méthodes participatives (conception à partir de dires d'experts) et basées sur la modélisation (approches *in silico*). Les approches utilisées pour construire et évaluer des scénarios d'usage des terres sont très diverses, mais peuvent être distinguées par (1) le type de scénario produit et (2) la méthode de production de scénarios *per se*, les deux étant liés. Suite à la présentation des typologies de scénarios, les actuels défis méthodologiques de la scénarisation sont proposés. Finalement, différentes méthodes de conception de scénarios illustrant ces défis sont présentées.

2.1. Typologie des scénarios et de leurs méthodes de production

2.1.1. Définition du terme scénario

Un scénario est composé : (1) d'une représentation de la situation initiale (appelée aussi « situation de référence » ou « baseline scenario »), (2) d'une description des facteurs de changement, (3) d'une description des changements (états du système), et (4) d'une description d'une image du futur (Alcamo et Henrichs, 2008 ; Encadré 1.1). Ces scénarios sont une image de la manière dont le futur pourrait se dérouler (Patel *et al.*, 2007). La terminologie du terme « scénario » n'est cependant pas consensuelle (Janssen *et al.*, 2009). Les scénarios sont parfois appelés « stratégies » (Bergez *et al.*, 2010). Ils peuvent également s'apparenter à des options dans une analyse de sensibilité¹³ d'un modèle à des entrées composées de pratiques agricoles (Bishop *et al.*, 2007 ; Colbach *et al.*, 2004). Ils peuvent également correspondre à des options permettant de répondre à des objectifs prédéfinis, les scénarios étant alors identifiés par exemple par une optimisation sous contraintes¹⁴ (Meyer-Aurich *et al.*, 2005 ; Veldkamp et Fresco, 1997). La terminologie utilisée est le plus souvent liée aux types de scénarios produits dans l'approche utilisée.

2.1.2. Critères de classification des scénarios

Du fait de la multitude des approches (qualifiée de « chaos » par Bradfield *et al.* (2005), de nombreuses typologies des scénarios ont été réalisées, basées sur différents critères (Alcamo et Henrichs, 2008 ; Börjeson *et al.*, 2006 ; Rotmans *et al.*, 2000 ; van Notten *et al.*, 2003 ; Wilkinson *et al.*, 2008). Parmi ces critères, trois sont systématiquement présents (Clavel, 2010) dans la définition des scénarios, auxquels sont associés différents avantages et inconvénients (Table 1.2) :

(1) l'objectif du scénario : prédictif, exploratoire ou normatif¹⁵. Ces scénarios répondent respectivement aux questions suivantes : « Que va-t-il arriver ? », « Que peut-il arriver ? », ou « Comment atteindre un objectif particulier ? » (Börjeson *et al.*, 2006) (Figure 1.2). Mahmoud *et al.* (2009) associent quant à eux les scénarios exploratoires aux scénarios basés sur les tendances futures et les scénarios normatifs à des options politiques/réglementaires ;

¹³ L'objectif d'une analyse de sensibilité est de déterminer dans quelle mesure la sortie d'un modèle varie lorsque l'on fait varier un ou plusieurs de ses éléments, par exemple ses paramètres et/ou ses variables d'entrées (Monod *et al.*, 2006).

¹⁴ L'optimisation sous contrainte permet d'explorer la gamme des solutions permettant de répondre à un ou plusieurs objectifs (Veldkamp et Fresco, 1997).

¹⁵ Les scénarios normatifs sont aussi appelés dans la littérature anticipatoires ou prescriptifs.

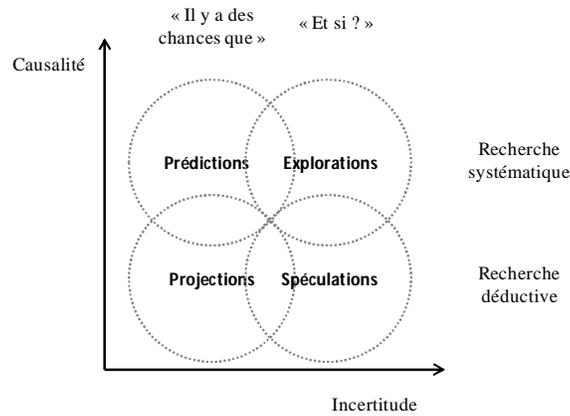


Figure 1.3. Typologie des études sur le futur (source: van Ittersum *et al.*, 1998, adapté de Becker et Dewulf, 1989).

Le niveau de causalité est ici défini par le type de modèle utilisé (e.g. un modèle mécaniste sera considéré plus haut qu'une régression sur cet axe).

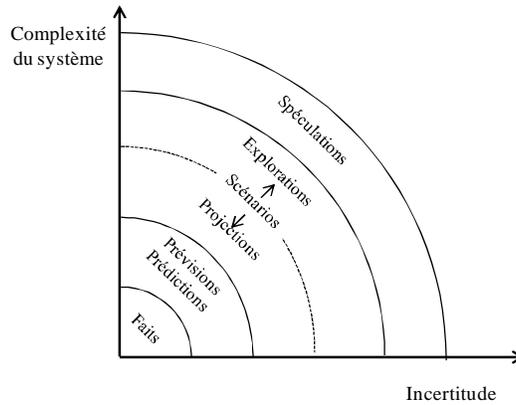


Figure 1.4. Classification des types de scénarios en fonction de leur incertitude et de la complexité du système appréhendé selon Zurek et Henrichs (2007)

		Type de scénario	
		Qualitatif (focus sur la narration)	Quantitatif (focus sur les valeurs numériques)
Méthode de développement de scénarios	Approches participatives	Histoires, photographies (ex. panels de scénarios, enquêtes)	Estimations numériques (ex. évaluation d'experts)
	Approches analytiques	Diagrammes (ex. modélisation d'inférence, basé sur des règles)	Estimation numérique (ex. modélisation intégrée)

Figure 1.5. Classification des types de scénarios et de leurs méthodes de développement selon Alcamo et Henrichs (2008).

Des exemples de technique utilisée pour élaborer les scénarios illustrent cette classification.

(2) le point de départ du scénario : le scénario peut être défini à partir de l'état actuel/initial ou de l'état final du système. Ces scénarios s'apparentent respectivement à des méthodes de « forecasting » (exploration des conséquences futures d'une série d'hypothèses) et de « backcasting » (exploration des conditions nécessaires pouvant amener à un état futur prédéfini) (Rotmans *et al.*, 2000) ;

(3) la nature des scénarios : qualitative ou quantitative. Les scénarios qualitatifs décrivent les futurs possibles de manière narrative (sous forme de phrases, de diagrammes). Les scénarios quantitatifs décrivent les scénarios sous forme numérique et sont souvent associés à l'utilisation d'un modèle (Alcamo et Henrichs, 2008 ; Mahmoud *et al.*, 2009 ; Rotmans *et al.*, 2000).

Dans ces typologies, d'autres caractéristiques intéressantes permettent de catégoriser les scénarios :

(4) les échelles temporelle et spatiale des scénarios (van Notten *et al.*, 2003) ;

(5) la complexité (Zurek et Henrichs, 2007) et la nature des dynamiques du système étudié (van Notten *et al.*, 2003) ;

(6) pour les scénarios quantitatifs, le degré de causalité du modèle utilisé pour explorer le futur (van Ittersum *et al.*, 1998).

A partir de ces critères, les différentes typologies proposent des grilles de lecture des scénarios. La plupart de ces typologies caractérise les scénarios en fonction de la prise en compte du degré d'incertitude dans le futur imaginé (Figure 1.3 ; Figure 1.4 ; van Ittersum *et al.*, 1998 ; Wilkinson et Eidinow, 2008 ; Zurek et Henrichs, 2007). L'incertitude est définie par Mahmoud *et al.* (2009) comme « l'incapacité à déterminer la magnitude réelle ou la forme des variables ou des caractéristiques d'un système ». Elle peut se caractériser par une probabilité du changement : « il est possible/prévisible que » vs. « et si ? » (Figure 1.2 ; Figure 1.3 ; Figure 1.4). L'incertitude peut provenir des dynamiques du système lui-même¹⁶ ou être liée aux hypothèses réalisées sur les facteurs de changement¹⁷ (Alcamo et Henrichs, 2008). En plus de l'incertitude, les typologies considèrent généralement un deuxième critère : la complexité¹⁸ du système (Zurek et Henrichs, 2007 ; Figure 1.4), la causalité des processus impliqués et du modèle (van Ittersum *et al.*, 1998 ; Figure 1.3) ou le niveau des enjeux décisionnels (Wilkinson et Eidinow, 2008). Dans les deux premiers cas, le critère de classification des scénarios se réfère au système étudié dans l'approche scénario : *l'objet* du scénario. Wilkinson et Eidinow (2008) s'intéressent davantage aux *enjeux* et à la nature de l'objectif sur lesquels porte l'approche. Les critères de définition de Börjeson *et al.* (2006) complètent les précédents, en se focalisant sur *le changement* défini par le scénario. Ces auteurs considèrent d'une part l'origine du changement, externe ou interne au système¹⁹ (i.e. externe vs. stratégique dans la Figure 1.2). Ils considèrent d'autre part la nature et l'ampleur du changement : ajustements ou modifications profondes du système étudié (respectivement préservation et transformation dans la Figure 1.2).

¹⁶ Cette incertitude est liée aux hypothèses des scénarios : prix des cultures sur le marché, climat.

¹⁷ Cette incertitude est liée aux hypothèses sur le fonctionnement du système en réponse à un changement (ex. processus impliqués ou paramètres du modèle, van Ittersum *et al.*, 1998).

¹⁸ La complexité du système est ici liée à ses dynamiques, interactions et rétroactions entre les différentes parties du système et/ou à son échelle temporelle et spatiale.

¹⁹ Le système inclut ici les acteurs agissant sur ses caractéristiques.

Critère	Type de scénario	Avantages	Inconvénients
Objectif du scénario	Prédictif	Ils présentent une faible incertitude ^{d,e} et sont généralement considérés comme objectifs et neutres du point de vue des valeurs ^f .	Ils sont associés à des systèmes relativement simples ^e , ils peuvent manquer de prise en compte du contexte et être trop étroits dans leur prise en compte du problème ^f .
	Exploratoire	Ils sont associés à des systèmes plus complexes ^e .	Ils présentent une forte incertitude ^{a,e} et les options envisagées peuvent manquer de faisabilité ^g .
	Normatif	Ils explicitent le contexte et mettent en lumière les valeurs ^f . Ils sont utiles pour les décideurs publics/décideurs politiques de par leur éclairage des impacts possibles de nouvelles normes/règlementations ^g . Ils s'attachent à évaluer la faisabilité des options définies ^b .	Le risque est de réduire l'espace des solutions à une solution optimale au problème posé (évaluation par modélisation) ^h . Ils comportent des jugements extra-scientifiques (politiques) sur la manière dont le problème doit être résolu ^b .
Point de départ du scénario	Backcasting	Ils sont créatifs, car ils limitent la tendance naturelle d'extrapoler le futur à partir des situations passées ou présentes : ils permettent ainsi de nouveaux éclairages ^c . Ils fournissent des séquences d'évènements ^c et cherchent l'émergence de stratégies pour atteindre le futur souhaité ⁱ .	La nature « fantastique » de l'état final peut réduire l'engagement du public ^c . L'impact des futures technologies reste opaque ^c . Le concept pour leur élaboration est difficile à expliquer et la méthode difficile à implémenter ⁱ .
	Forecasting	Ils permettent d'insister sur les tendances des futures incertitudes, par l'exploration des facteurs de changement basés sur des stratégies de gestion prédéfinies ⁱ .	Les scénarios peuvent être relativement attendus, car très liés aux situations passées et présentes ⁱ .
Nature des scénarios	Scénarios qualitatifs	Ils permettent la prise en compte simultanée de points de vue d'acteurs multiples ^a et la description de système complexe ^a . Ils facilitent la communication des résultats ^a .	Ils sont issus de modèles mentaux dont les hypothèses ne sont pas toujours explicitées/articulées ^a . Tester les hypothèses sous-jacentes des scénarios n'est pas aisé ^a . Ils ne satisfont pas le besoin, le cas échéant, de données quantitatives ^a .
	Scénarios quantitatifs	Ils fournissent des données numériques aidant à l'évaluation ^a . Leurs hypothèses sous-jacentes sont plus faciles d'accès (i.e. hypothèses du modèle) ^a . Ils sont évalués avec des modèles reconnus par la communauté scientifique ^a . Ils peuvent être utilisés pour vérifier la cohérence de scénarios qualitatifs ^a .	La précision numérique nécessaire peut être mal interprétée, i.e. les connaissances sur le futur peuvent être surestimées ^a . Souvent issus de modèle, ils relèguent au second plan les hypothèses sur le futur ^a . Ils reflètent souvent un unique point de vue ^a . Ils peuvent être difficiles d'accès pour les non-spécialistes ^a . L'évaluation risque de se limiter aux aspects pour lesquels un modèle existe ^a . Ils ne permettent pas de prendre en compte des facteurs non quantifiables (valeurs, changements culturels, caractéristiques institutionnelles) ^b .

Table 1.2. Avantages et inconvénients des différents types de scénarios.

Sources : ^aAlcamo et Henrichs (2008) ; ^bSwart *et al.* (2004) ; ^cBishop *et al.*, 2007 ; ^dvan Ittersum *et al.* (1998) ; ^eZurek *et al.* (2007) ; ^fGidley *et al.* (2009) ; ^gWilkinson et Eidinow (2008) ; ^he.g. Janssen et van Ittersum (2007) ; ⁱHouet *et al.* (2010) ; ^jKok *et al.* (2006)

2.1.3. Classification des méthodes de construction de scénarios

Les études construisant et/ou étudiant des scénarios d'usage des sols sont extrêmement nombreuses (111 543 références²⁰ au 13/08/2012 dans le Web of Knowledge). Elles sont également très diverses : études théoriques, méthodologiques ou empiriques (Varum et Melo, 2009). Les méthodes²¹ qu'elles utilisent pour construire les scénarios sont également très nombreuses. Le choix de la méthode dépend des caractéristiques susnommées des scénarios souhaités dans leur contexte de développement (Börjeson *et al.*, 2006) et de l'objectif global de construction de scénario (Alcamo et Henrichs, 2008). Trois objectifs principaux, non exclusifs, de l'analyse de scénarios sont définis par Alcamo et Henrichs (2008) : (1) un objectif éducatif, informatif du public ; (2) un objectif scientifique de recherche ; (3) un objectif d'aide à la décision et à la planification stratégique.

A partir notamment de ces objectifs (Rauschmayer et Wittmer, 2006), un critère reconnu pour la classification des approches de construction des scénarios concerne les personnes impliquées dans la construction du futur : scénarios *experts* ou *participatifs* (Rotmans *et al.*, 2000). Deux types d'approches sont alors distingués : les approches analytiques (objectif 2) et les approches participatives²² (davantage liées aux objectifs 1 et 3), et leur combinaison (Alcamo et Henrichs, 2008 ; Rauschmayer et Wittmer, 2006 ; Zurek *et al.*, 2007). Ces deux types d'approches peuvent permettre d'élaborer des scénarios quantitatifs ou qualitatifs (Alcamo et Henrichs, 2008 ; Zurek *et al.*, 2007 ; Figure 1.5). Un deuxième critère de classification se réfère à la *complexité* du système étudié (Zurek et Henrichs, 2007), qui peut nécessiter l'utilisation d'un *modèle* pour construire ou évaluer les scénarios. Les techniques d'élaboration de scénarios dépendent du type de méthode utilisée. Les enquêtes et les ateliers peuvent être utilisés avec la méthode participative. La modélisation exploratoire ou d'optimisation peut être utilisée avec la méthode analytique (Börjeson *et al.*, 2006). Les méthodes analytiques sont plus ancrées et utilisées en sciences biologiques et les méthodes participatives en sciences sociales (Greeuw *et al.*, 2000), malgré un rapprochement récent entre sciences sociales et biotechniques, tendant à diffuser les méthodes participatives en sciences biologiques.

2.1.3.1. Les approches participatives

Dans ce type d'étude, une importance particulière est apportée aux choix que les acteurs réalisent quand le contexte change et à leur implication active dans les décisions sur les utilisations futures des terres, en particulier agricoles. Les processus participatifs peuvent expliciter les divergences de points de vue, faciliter un consensus avec la légitimité permise par la participation et d'initier un processus d'apprentissage (Rauschmayer et Henrichs, 2006), en apportant des connaissances valables aux gestionnaires (Varum et Melo, 2009). La présence de scientifiques dans les démarches participatives peut apporter une plus-value à la démarche. En effet, l'intégration de connaissances locales et scientifiques peut permettre une meilleure compréhension des systèmes et processus dynamiques complexes (Reed, 2008). Dans une approche de construction de scénarios, les scientifiques peuvent apporter leurs connaissances sur les processus importants et leurs liens avec le discours des acteurs, qui définissent/enrichissent les discours en apportant les points de vue « humains » dans l'élaboration du futur (Swart *et al.*, 2004).

²⁰ Recherche réalisée sur Web of Knowledge (toutes bases de données) avec l'équation : Topic=((scenari* or strateg* or manag*) and (land or agri*) and ((model* or quantitative or ex ante) or (participator* or stakeholder* or integrated))).

²¹ Bishop *et al.* (2007) définissent une méthode (aussi appelée technique) comme « le moyen systématique utilisé par un professionnel pour générer un produit » (ici le scénario).

²² Ces méthodes s'apparentent, selon Rauschmayer et Wittmer (2006) à des approches « délibératives » ; et selon Greeuw, 2000) à des approches « interactives » ou « communicatives ».

Encadré 1.2. Typologie des méthodes participatives (source: van Asselt et Rijkens-Klomp, 2002)

van Asselt et Rijkens-Klomp (2002) typent les méthodes participatives selon leurs objectifs sur les résultats (diversité vs. consensus) et la définition des résultats (démarche participative *per se* (but) ou sorties de la démarche participatives (moyen)) :

(A) Atteindre un consensus, le résultat étant la démarche participative

- Planning participatif : approche par laquelle les acteurs et les citoyens influencent et partagent le contrôle sur les décisions et les ressources qui les affectent

(B) Atteindre un consensus, le résultat étant la sortie de la démarche participative

- Jury de citoyens : approche permettant, à travers un processus de délibération à partir d'informations pluri-perspectives, d'obtenir la participation de citoyens informés sur des décisions politiques

- Conférence de consensus : enquête publique autour d'un groupe de citoyens chargé d'évaluer un sujet socialement controversé (Joss et Durant, 1995)

(C) Capter la diversité des points de vue, le résultat étant la sortie de la démarche participative

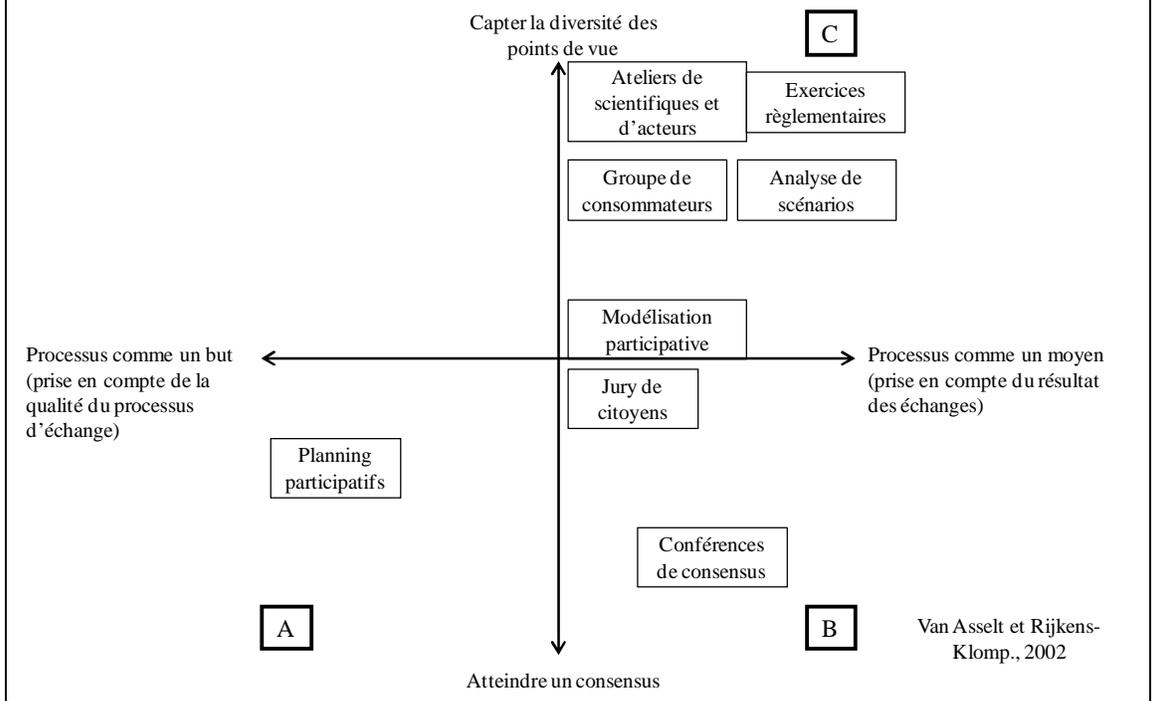
- Ateliers de scientifiques et d'acteurs : cette approche permet à un groupe hétérogène composé de scientifiques et d'acteurs d'échanger leurs connaissances sur une question particulière

- Groupe de consommateurs : approche par laquelle les préférences, opinions et valeurs des participants sont révélées

- Exercice réglementaire : processus créatif par lequel un groupe de participants synthétise les connaissances de différentes sources et explore différentes options politiques (Brewer, 1986)

- Analyse de scénarios : approche interactive engageant un groupe d'acteurs dans un processus créatif pour l'identification de problématiques clés, l'élaboration et l'exploration de scénarios pour une meilleure intégration des connaissances dans le processus décisionnel de l'organisation.

- Modélisation participative : implication active des utilisateurs du modèle dans le processus de modélisation (Eden et Hackerman, 1996)



La méthode participative employée dépend de l'objectif et de l'objet de l'étude : l'intérêt de l'étude concerne-t-il les résultats de la démarche et/ou l'apprentissage ? ; Souhaite-t-on atteindre un consensus ou illustrer la diversité des points de vues des acteurs impliqués ? (van Asselt et Rijkens-Klomp., 2002 ; Encadré 1.2 ; van den Belt, 2004c). Blackstock *et al.* (2007) définissent ainsi trois objectifs d'implication des acteurs dans un processus de recherche, également relatifs au processus et au résultat souhaité pour la démarche. Le premier objectif est normatif, visant à encourager l'apprentissage social et individuel. Le deuxième objectif est substantif, pour améliorer la compréhension des problématiques et la sélection des solutions appropriées en encourageant l'expression de perspectives multiples. Le troisième objectif est instrumental, cherchant à encourager la collaboration pour assister l'implémentation et réduire l'occurrence de conflits.

Pour définir des scénarios, le choix du type de méthode participative va également dépendre du degré d'implication des acteurs. Lynam *et al.* (2007) en distinguent trois, avec une implication croissante dans le processus décisionnel: (1) l'extraction des préférences/valeurs des acteurs à partir de travaux de groupe ; (2) les méthodes de co-apprentissage qui entraînent des changements de perspective des acteurs, changements qui seront pris en compte dans le processus décisionnel ; (3) les méthodes de co-gestion où les acteurs sont inclus dans le processus décisionnel. Cette distinction prévaut dans les approches dont la finalité est une prise de décision institutionnalisée. Pour les études ne bénéficiant pas de cette institutionnalisation ou dont l'objectif est à plus long terme, Alcamo et Henrichs (2008) définissent également trois niveaux d'implication des acteurs par la *fonction* des acteurs dans la démarche : (1) l'information/la communication sur les résultats de l'évaluation des scénarios (Tress et Tress, 2003); (2) la consultation des acteurs pour l'analyse des résultats (Hattermann *et al.*, 2011), ou pour prendre en compte leurs préférences dans la construction ou l'évaluation des scénarios (Le *et al.*, 2010 ; Tompkins *et al.*, 2008) ; (3) l'implication/la participation des acteurs pour l'ensemble de l'approche, depuis le développement des scénarios jusqu'à leur évaluation (Therond *et al.*, 2009). Le choix d'un niveau d'implication va dépendre de l'objectif de l'exercice réalisé : recueillir des réactions, compléter une information quasi-complète ou co-construire et co-évaluer des scénarios.

2.1.3.2. Les approches analytiques

Les approches analytiques sont basées sur l'utilisation de modèles (Börjeson *et al.*, 2006 ; Greeuw *et al.*, 2000 ; van Notten, 2005). Les modèles peuvent être conceptuels²³, arithmétiques ou informatiques (i.e. modèles de simulation numériques). Ils permettent d'examiner les interactions futures entre les variables d'intérêt (van Notten, 2005). Les modèles informatiques fournissent l'avantage d'être plus rigoureux et précis que les modèles conceptuels, permettant également de traiter un grand nombre d'informations/de scénarios (Börjeson *et al.*, 2006).

Ces approches, qui œuvrent principalement avec des données quantitatives, pour l'analyse de modèles, de scénarios et des analyses de risques, fournissent des cadres d'analyse pour représenter et structurer, de manière intégrée, les connaissances scientifiques sur une thématique particulière (Greeuw *et al.*, 2000). La structure du modèle facilite le recueil de données systématique et permet de s'assurer d'une description cohérente des différentes parties du système (Börjeson *et al.*, 2006).

Börjeson *et al.* (2006) distinguent trois approches principales pour la modélisation informatique. La première approche concerne les analyses de séries temporelles. Cette modélisation se base sur l'analyse de données historiques, acquises dans un système structuré et historiquement défini. Elle peut difficilement être utilisée pour développer des scénarios exploratoires. La deuxième approche est la modélisation exploratoire. Elle se base sur les liens causals sous forme d'équations connectant les

²³ La modélisation conceptuelle se réfère à des procédures intellectuelles structurées sur les impacts croisés et/ou à l'analyse morphologique (van Notten, 2005)

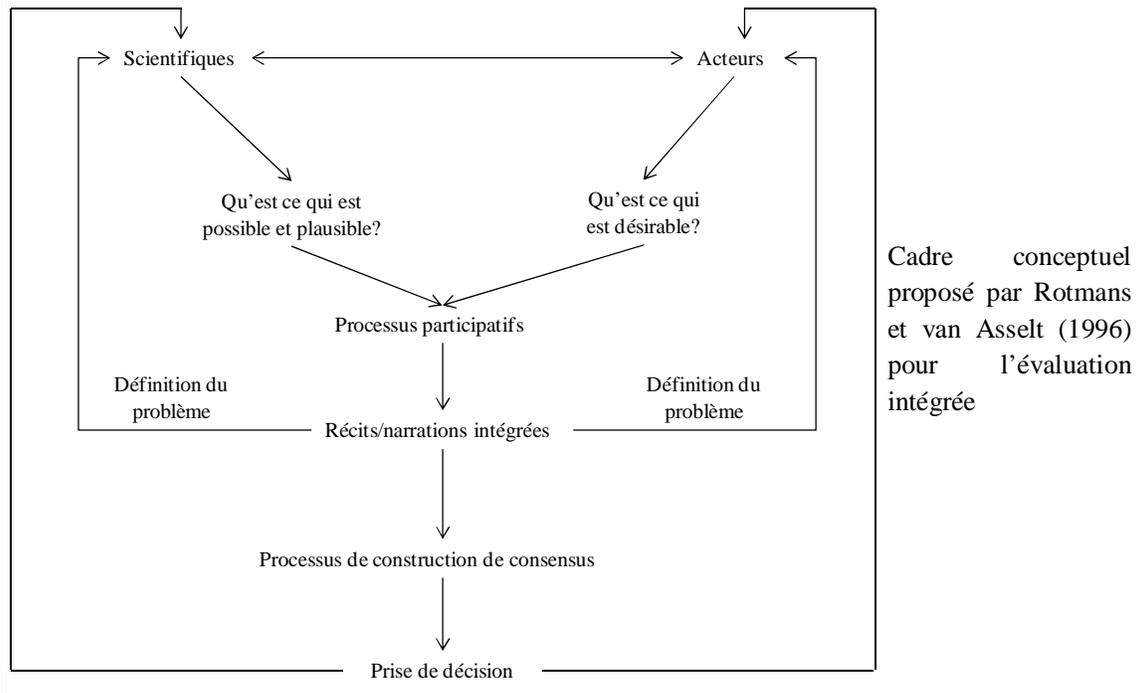
Encadré 1.3. Le concept d'évaluation intégrée, selon Rotmans et van Asselt (1996)

L'évaluation intégrée présente deux caractéristiques majeures selon Rotmans et van Asselt (1996) : elle doit apporter une valeur ajoutée par rapport à des connaissances purement disciplinaire et elle doit fournir aux décideurs publics et/ou aux acteurs des informations utiles.

Mener une évaluation intégrée requiert d'utiliser des approches complémentaires, formelles et expérimentales, comme des modèles et des approches participatives.

L'utilisation d'un modèle pour l'évaluation intégrée est particulièrement utile pour analyser le comportement dynamique d'un système, étudier les interactions entre différentes problématiques ; expliciter les incertitudes et analyser leur accumulation ; développer des stratégies. Les modèles peuvent ainsi permettre de définir et d'éclairer les questions pertinentes à étudier, ainsi qu'être un outil de communication entre les scientifiques et les décideurs publics/acteurs.

Cependant, la question traitée peut être trop complexe, subtile ou ambiguë pour être entièrement représentée par les équations mathématiques des modèles (ex. valeurs, préférences et choix des acteurs). Les approches participatives peuvent aider à appréhender cette complexité, tout comme l'analyse de scénarios, qui permet d'explorer une variété d'images possibles du futur.



Scénario narratif (qualitatif)	Modèle (scénario quantitatif)
Caractérise le futur par des histoires, des idées et des visions	Caractérise le futur par des chiffres et des règles sur le comportement du système
Tous les aspects importants pour les acteurs peuvent être inclus	Les aspects inclus dépendent des données et connaissances disponibles
Pas de règle de validation sur le système actuel	Validé sur le système actuel
=> large flexibilité	=> flexibilité limitée
Les effets sociaux et sociétaux sont inclus	Il est difficile d'inclure les aspects sociaux
Il n'y a pas de d'ensemble fixe d'hypothèses	Ensemble fixe d'hypothèses
Ne sont pas toujours cohérents	Cohérents
Pas de compréhension claire du système	Compréhension du système
Pas besoin de données	Données nécessaires

Table 1.3. Caractéristiques des scénarios narratif ou conçus à partir de modèles selon van Vliet *et al.* (2010). **Avantage** / **Inconvénient (ou difficulté)** / Caractéristique neutre

variables d'intérêt définies par la thématique traitée et les connaissances scientifiques disponibles. La modélisation exploratoire peut permettre d'utiliser des scénarios exploratoires ou prédictifs, en fonction des hypothèses utilisées dans le modèle. La dernière approche est la modélisation d'optimisation. Elle se base sur la recherche de solutions (combinaison d'entrées du modèle) permettant de satisfaire un ou plusieurs objectif(s) donné(s) (sortie(s) du modèle).

Les modèles peuvent permettre de générer des scénarios (optimisation sous contraintes, Santé-Riveira *et al.*, 2008, Veldkamp et Fresco, 1997 ; analyse de sensibilité sur des variables sélectionnées par des experts, Colbach *et al.*, 2004). Ils peuvent également servir à leur évaluation (Le *et al.*, 2010). Le principal défaut des modèles concerne la difficulté de leur validation, pour laquelle des données historiques complètes, souvent difficiles à obtenir, sont nécessaires (Bishop *et al.*, 2007).

2.1.3.3. *Approches participatives vs. Approches analytiques*

Les approches analytiques peuvent être plus rigoureuses et présenter une meilleure reproductibilité que les approches participatives, mais sont moins flexibles et plus déterministes (van Notten, 2005). Elles sont également moins coûteuses et chronophages pour créer et évaluer des scénarios (Börjeson *et al.*, 2006). Les méthodes analytiques par modélisation du système créent la meilleure représentation quantitative des variables qui décrivent l'état futur du système (Bishop *et al.*, 2007). Elles permettent d'explorer une gamme large de situations en temps limité. La gamme de situations explorée sera réduite dans une approche participative, sur la base du jugement des acteurs et/ou des experts (Janssen et van Ittersum, 2003). Cette réduction, subjective, parfois arbitraire, peut limiter l'exploration des solutions permettant d'obtenir l'objectif visé (Dogliotti *et al.*, 2003). A contrario, une limite des approches analytiques par rapport aux approches participatives est leur décontextualisation (économique, sociale, pédoclimatique), pouvant mener à des résultats trop prescriptifs, voire inadaptés localement. Les recommandations issues de ces approches peuvent ainsi ne jamais être implémentées du fait d'un manque de support local (van den Belt, 2004c). Les approches participatives peuvent permettre une meilleure évaluation du rapport coût/efficacité des scénarios/solutions imaginées (Voinov et Bousquet, 2010), prendre en compte les marges de manœuvre réelles/possibles des acteurs (Joannon *et al.*, 2006) et permettre une dissémination des résultats.

2.1.4. **Scénariser le futur: quels défis méthodologiques ?**

Les approches participatives et analytiques présentent ainsi chacune des avantages dans la construction et l'élaboration des scénarios (Table 1.3). Leur combinaison pourrait permettre d'imaginer et d'évaluer le futur, en termes de scénarios narratifs et quantifiés pouvant être évalués numériquement. De nombreux auteurs (Alcamo, 2008b ; Therond *et al.*, 2009) soulignent ainsi l'intérêt de la participation d'acteurs dans le processus de conception des scénarios et l'apport de la modélisation pour leur évaluation. Combiner ces deux méthodes peut permettre de réaliser une évaluation intégrée²⁴ (*integrated assessment*) sur une thématique particulière (Encadré 1.3).

La combinaison de ces deux types d'approches, résultant en des scénarios qualitatifs (narratifs) et quantitatifs, est largement reconnue comme un défi méthodologique (Alcamo, 2008b ; Freeuw, 2000 ; Kok et van Delden, 2009 ; Leenhardt *et al.*, 2012 ; Rauschmayer et Wittmer, 2006 ; Swart *et al.*, 2004 ; Therond *et al.*, 2009 ; van Notten *et al.*, 2003 ; van Notten, 2005 ; Walz *et al.*, 2007 ; Kok and van Delden, 2009). La combinaison de ces deux approches peut permettre de réaliser des scénarios plus robustes et cohérents (van Notten, 2005). Ce défi méthodologique de conversion se pose principalement à deux étapes-clés : la spécification du problème et l'analyse des sorties du modèle

²⁴ L'évaluation intégrée est définie comme un processus interdisciplinaire de synthèse d'interprétation et de communication des connaissances de diverses disciplines scientifiques afin d'apporter des informations pertinentes aux décideurs/acteurs sur un problème spécifique (European Environmental Agency, 2001).

(Leenhardt *et al.*, 2012). Des méthodes restent à définir pour réaliser ces deux étapes (Alcamo, 2008b). Concernant la spécification du problème et l'élaboration des scénarios, la question de la place des deux approches se pose. Si la construction des scénarios commence avec le modèle, leur dimension narrative risque d'être limitée aux seuls éléments explicitement pris en compte par le modèle (pas de prise en compte des dimensions sociales et institutionnelles par exemple). *A contrario*, si la construction des scénarios commence par leur narration, le modèle ne pourra pas inclure toute leur richesse (Greeuw *et al.*, 2000). Le problème de conversion du problème est souvent lié à la complexité et à la précision requise pour les paramètres nécessaires au modèle (Walz *et al.*, 2007). Concernant l'étape de « traduction » des sorties, la question porte sur la communicabilité des résultats et leur transparence.

Deux autres défis méthodologiques principaux sont posés par les approches scénarios²⁵. Le premier défi concerne l'échelle spatiale à considérer et la prise en compte de plusieurs échelles spatiales (Rotmans *et al.*, 2000 ; Swart *et al.*, 2004), y compris lorsque les méthodes participatives et analytiques sont combinées (Stoate *et al.*, 2009). Ce problème d'échelle est relatif à la nécessité de lier des échelles « micro » (champ, exploitation agricole) à des échelles « macro » (marché, secteurs) (van Ittersum *et al.*, 2008).

Le deuxième défi concerne la pluridisciplinarité (Swart *et al.*, 2004), avec la nécessaire prise en compte dans les scénarios des dimensions sociales, économiques, environnementales et institutionnelles (Rotmans *et al.*, 2000). Cette prise en compte nécessite la participation d'acteurs d'horizons divers dont l'implication (qui, pourquoi et comment ?) doit être systématiquement et rationnellement explicitée (Rauschmayer et Wittmer, 2006).

2.2. Comment combiner une méthode participative et une méthode analytique ? Eléments de l'état de l'art

Pour différencier les approches et études combinant méthodes participative et analytique, nous nous focaliserons sur deux éléments principaux pour caractériser l'inclusion des acteurs et du modèle dans le processus :

- (1) le type de participation²⁶ pour l'élaboration et l'évaluation des scénarios narratifs quantitatifs (qui construit et paramètre les scénarios ?)
- (2) la place de la participation dans le choix/l'élaboration du modèle d'évaluation numérique des scénarios (qui construit et utilise le modèle ?) (Figure 1.6).

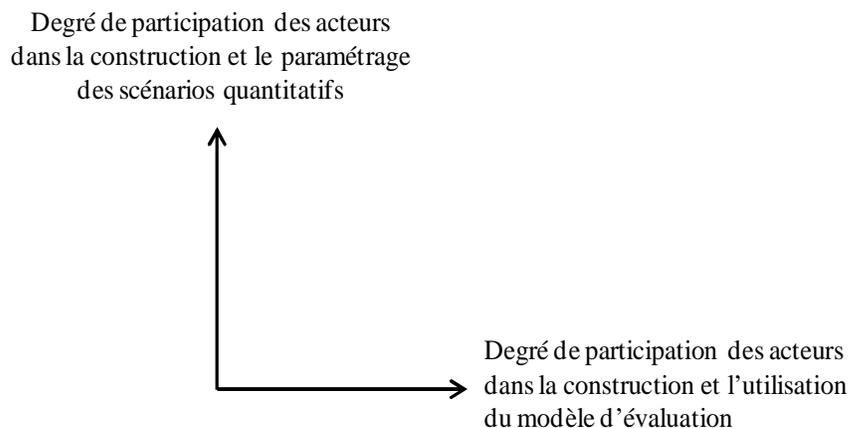


Figure 1.6. Grille de lecture appliquée pour typer les études/approches utilisant à la fois une méthode participative et un modèle informatique

²⁵ Clavel (2010) définit l'approche scénario comme « une procédure qui met en œuvre des participants et des méthodes pour construire les différents éléments clés des scénarios ».

²⁶ Au sens d'Alcamo et Henrichs (2008), i.e. information, consultation ou participation, voir § 2.1.3.1 de ce chapitre

Encadré 1.4. Méthodes de construction participatives de modèles, d'après Voinov et Bousquet (2010)

(1) Construction de Modèle en Groupe (*Group Model Building*)²⁷ : cette méthode est basée principalement sur la construction d'un modèle conceptuel, à l'aide d'outils visuels (diagrammes causals), reposant ainsi moins sur de la modélisation formelle. Son objectif est de participer à la prise de décision.

(2) Modélisation Arbitrée (*Mediated Modelling*) : cette méthode s'appuie sur l'explicitation par les acteurs des dynamiques du système, dont l'implémentation dans un logiciel est guidée par les points de vue des acteurs. Elle nécessite une participation intensive et un fort niveau d'implication des acteurs. Son objectif est la médiation, i.e. la construction d'un consensus (van den Belt, 2004a).

(3) Modélisation d'Accompagnement (*Companion Modelling*) : cette méthode combine des systèmes multi-agents co-construits et des jeux de rôles, le modèle évoluant au fur et à mesure de l'étude. Son objectif principal est la prise de conscience des acteurs sur la diversité des points de vue et leurs conséquences sur la thématique étudiée (Barreteau *et al.*, 2010).

(4) Planification d'une Vision Partagée (*Shared Vision Planning*)²⁸ ; *SVP*) : cette méthode combine trois pratiques : la planification traditionnelle de la ressource (en eau), la participation structurée du public et la modélisation informatique collaborative. Son objectif est de formuler des options pour des problématiques de planification et règlementaires, ici la gestion de l'eau (SharedVisionPlanning, 2012).

→
Participation dans la construction du modèle d'évaluation

	Pré-construit	Co-paramétré/co-validé	Co-construit
↑ Participation des acteurs dans la construction des scénarios quantitatifs	Co-construction de scénarios narratifs ET quantitatifs	Thérond <i>et al.</i> , 2009	Peterson <i>et al.</i> , 2004 Van den Belt <i>et al.</i> , 2004 Cornwell, 2004
	Co-construction de scénarios narratifs / <i>Inclusion de préférences</i>	Walz <i>et al.</i> , 2007 Lippe <i>et al.</i> , 2011 Clavel <i>et al.</i> , 2011 Ronfort <i>et al.</i> , 2011	Becu <i>et al.</i> , 2008 Barnaud <i>et al.</i> , 2008
	Scénarios construits par les chercheurs	Bacic <i>et al.</i> , 2006 Clavel <i>et al.</i> , 2012	Ryu <i>et al.</i> , 2009 Bah <i>et al.</i> , 2006

Figure 1.7. Implication des acteurs pour la construction du modèle et des scénarios dans les principaux cas d'étude présentés.

Aucun cas d'étude n'a été identifié dans la case grisée.

²⁷ Les termes en italique correspondent aux termes consacrés en anglais.

²⁸ Aussi appelée Modélisation de la Vision Partagée (*Shared Vision Modelling*) dans Ryu *et al.* (2009)

Nous aborderons ici principalement les méthodes analytiques incluant l'usage de modèles de simulation quantitative, mieux adaptées pour procéder à une évaluation quantitative des impacts des changements imaginés dans les scénarios à évaluer. Cet état de l'art n'a pas de visée exhaustive mais a pour objectif d'illustrer la diversité des approches et de les classer en fonction des critères définis précédemment, de manière à identifier les éventuels manques.

Dans des situations dans lesquelles des acteurs sont impliqués, Sterk *et al.* (2009) identifient trois rôles majeurs d'un modèle : (1) un rôle heuristique, permettant l'apprentissage et une meilleure compréhension du système ; (2) un rôle symbolique, permettant de mettre une problématique à l'ordre du jour ; (3) un rôle relationnel, permettant de créer une communauté. Dans le cas d'un modèle permettant d'évaluer des scénarios alternatifs, en particulier si son utilisation est combinée à une approche participative, le modèle peut jouer un ou plusieurs de ces rôles.

2.2.1. Approches impliquant la construction participative du modèle d'évaluation et des scénarios

Plusieurs approches pour développer un modèle de manière participative ont été proposées dans la littérature. Voinov et Bousquet (2010) en distinguent quatre principales (Encadré 1.4), dont trois impliquent la construction d'un modèle de simulation (Modélisation Arbitrée, Modélisation d'Accompagnement et Planification de la Vision Partagée), qui pourrait permettre, le cas échéant, d'évaluer des scénarios.

2.2.1.1. La Modélisation Arbitrée (*Mediated Modelling*) : co-construction de scénarios quantitatifs

Van den Belt *et al.* (2004) utilisent la méthode *Mediated Modelling* pour gérer des conflits autour de l'utilisation des terres aux Etats-Unis. Dans cette étude, un modèle préliminaire est construit par les chercheurs à partir d'enquêtes, ce modèle étant par la suite rejeté par les acteurs, menant à la construction d'un nouveau modèle. Après huit sessions de travail sur la construction et la calibration du modèle, huit scénarios *exploratoires quantitatifs* sont construits par les acteurs, à partir de la *situation*. Ces scénarios se réfèrent aux principales forces de changement impactant l'utilisation des terres : croissance de la population, urbanisation agglomérée ou non, gestion de l'érosion sur les terres agricoles. Des scénarios quantitatifs exploratoires à partir de la situation initiale et d'un modèle construit de manière participative sont également développés par Cornwell (2004) sur la gestion d'un Parc National. De nombreux scénarios du même type sont construits par Peterson *et al.* (2004) à partir de la Modélisation Arbitrée, le développement du modèle ayant été moins participatif (Figure 1.7 ; Table 1.4).

2.2.1.2. La Modélisation d'accompagnement (*Commod*) : co-construction de scénarios narratifs

Becu *et al.* (2008) utilisent la méthode *Commod* sur une problématique de gestion de l'eau en Thaïlande. Dans cette étude, un modèle préliminaire d'évaluation des scénarios, défini par les chercheurs, est proposé aux participants de l'étude. Ce modèle va évoluer pendant l'étude sous l'impulsion des acteurs. Les scénarios sont ici utilisés pour explorer les options alternatives pour mieux utiliser et partager la ressource en eau, ils partent de la *situation initiale*, sont de type *exploratoire et narratif*. Les scénarios d'intérêt sont identifiés et quantifiés par les chercheurs. Les scénarios narratifs sont construits par les participants de l'étude, qui sont des acteurs locaux²⁹ : les agriculteurs concernés, le maire, des représentants administratifs et le gérant de la société locale d'eau potable. L'application de la méthode *Commod* par Barnaud *et al.* (2008) a également conduit à des scénarios *exploratoires et narratifs construits à partir de la situation initiale*, construits par les acteurs, puis quantifiés par les chercheurs. Cette étude permet une meilleure prise en compte de

²⁹ Nous définissons ici l'acteur local comme tout individu/structure intervenant au niveau local (Morales *et al.*, 2010).

Implication des acteurs sur le modèle		Oui						Non						
Méthode		Companion Modelling			Mediated Modeling			SVP	Méthodes originales					
Etude		<i>Becu et al., 2008</i>	<i>Barnaud et al., 2008</i>	<i>Bah et al., 2006</i>	<i>van den Belt et al., 2004</i>	<i>Peterson et al., 2004</i>	<i>Cornwell, 2004</i>	<i>Ryu et al., 2009</i>	<i>Bacic et al., 2006</i>	<i>Walz et al., 2007</i>	<i>Lippe et al., 2011</i>	<i>Clavel et al., 2011; 2012</i>	<i>Ronfort et al., 2011</i>	<i>Therond et al., 2009</i>
Participation	Objectif de la participation	Aide	Aide	Aide	Aide	Aide	Aide	Aide	App	App	App	Aide	Aide	Aide
	Objectif des chercheurs	Meth	Meth	Res, App	Aide	Aide	Res	Res	Meth	Res	Res	Meth	Meh	Meth
	Implication sur la conception du modèle	M/V	M/V	CC	CC	Faible	CC	CP	Non	Non	Non	Non	Non	Non
	Implication sur la conception des scénarios	CC Na	CC Na	Non	CC Na et Q	CC Na et Q	CC Na et Q	Non	Non	CC Na	Paramétrage itératif	Faible (ref Na)	Faible (var)	CC Na et Q
	Type d'acteurs	Agr, M, Ad, SP	Agr, V	Agr, F, PN	Ad, ONG, Agr, F, PI	Sc, Ad, SP, V	Experts (?)	(?)	Agr, SD	DP, V, autres (?)	Ad, Agr	SD, Sc	Ad, Sc, SD	Ad
Scénario	Objectif	E	E	E	E	E	E	-	E	E	E	E	E	E
	Point de départ	SI	SI	SI	SI	SI	SI	SI	SI	SI	SI	SI	SI	SI
	Nature	<i>Na</i>	<i>Na (règles)</i>	Q	Na et Q	Na et Q	Na et Q	Q	Q	Na et Q	Na et Q	Na (ref) / Q (sc)	Na et Q	Na et Q
	Prise en compte de l'incertitude	-	Oui (P, Cl)	Non	Non	Non	Non	Non	Non	Oui	Non	Oui (Cl)	Oui (nb EA)	Oui
	Echelle spatiale	BV	Eas	UP	BV	BV	PN	BV	BV	R	C	BV	BV	Plusieurs possibles (R,EU)
	Echelle temporelle	3 ans	15 ans	30 ans	20 ans	?	50 ans	20 ans	?	50 ans	45 ans	1 an	8 ans	10 ans
	Complexité du système	+	+	+	+/-	+/-	+/-	+	+/-	++	++	+/-	+	+++
	Causalité du modèle	++	+/-	++	+/-	++	++	+/-	++	++	++	++	++	++
	Nombre de scénarios produits	3	6	8	8	Multiples (?)	7	16	6	2	9	3 (sc) + ref.	Multiples	2

Table 1.4. Types de participation utilisée et de scénarios produits pour les principaux cas d'étude présentés.

Légende : *italique* : non-explicite dans le modèle ; (?) : non mentionné dans l'article ; +/- : modéré ; + : relativement élevé ; ++ : élevé ; +++ : très élevé ; Ad : administratifs/agences gouvernementales/décideurs publics ; Agr : agriculteurs ; Aide : aider à la négociation, à la prise de décision collective ou au développement de recommandations ; App : apprentissage/compréhension ; BV : bassin versant ; C : commune ; CC : co-construction ; Cl : climat ; CP : co-paramétrage ; E : exploratoire ; EA : exploitation agricole ; EU : Europe ; F : forestiers ; M/V : modification et ou validation ; M : maire ; Méth : méthodologique ; Na : narratif ; nb : nombre, No : normatif ; ONG : organisation non-gouvernementale ; P : prix ; PI : promoteurs immobiliers ; PN : parc national ; Q : quantitatif ; R : région ; Res : résultats (scénarios et/ou simulations) ; Sc : scientifiques ; SD : services de développement ; SI : situation initiale ; SP : société privée ; SVP : Shared Vision Planning ; V : villageois/citoyens ; var : choix des variables des scénarios réalisé par les acteurs

l'incertitude (climat, prix), en lien notamment avec une certaine stochasticité du modèle d'évaluation. Suite à la construction d'un modèle à l'aide de l'approche Commod, les scénarios (*exploratifs et quantitatifs*) peuvent également être développés *a posteriori* par les chercheurs (Bah *et al.*, 2006) (Figure 1.7 ; Table 1.4).

2.2.1.3. La Planification de la Vision Partagée

Comme rapporté par Voinov et Bousquet (2010), très peu de littérature est disponible sur les applications de cette méthode, les cas d'études réalisés disponibles étant peu détaillés (SharedVisionPlanning, 2012). Dans l'étude menée par Ryu *et al.* (2009), le modèle est construit par les chercheurs et paramétré à partir de dires d'acteurs (prise en compte des objectifs des acteurs dans la pondération des fonctions objectifs du modèle d'optimisation). Les scénarios sont *normatifs* (recherche de solutions pour atteindre un objectif donné chiffré), *quantitatifs* et construits à partir de la situation de référence, les acteurs n'étant pas impliqués dans leur construction (Figure 1.7 ; Table 1.4).

2.2.2. Etudes où le choix du modèle est réalisé préalablement à l'implémentation de la démarche participative

Lorsque le modèle est développé/choisi préalablement à la consultation/participation des acteurs, plusieurs approches pour l'élaboration et l'évaluation des scénarios peuvent être distinguées. La distinction est réalisée à partir du degré de participation des acteurs dans l'élaboration des scénarios quantitatifs. La place de la participation dans des études visant à produire des scénarios est ici présentée à partir de cas d'études, permettant, à notre connaissance, d'illustrer la diversité de l'implication des acteurs dans des approches scénarios faisant intervenir un modèle pour l'évaluation des scénarios (Figure 1.7 ; Table 1.4).

Dans les approches où les scénarios quantitatifs sont développés par des chercheurs, les scénarios narratifs peuvent être construits ou non par les acteurs. Quand le processus participatif est postérieur à la construction des scénarios, l'objectif est principalement la compréhension d'une problématique traitée, par la présentation et la discussion collective des scénarios et de leurs conséquences (Bacic *et al.*, 2006). Ces scénarios sont alors *quantitatifs, exploratifs et construits à partir de la situation initiale*. Ce type d'approche peut permettre une discussion collective sur la faisabilité et l'efficacité de diverses mesures de gestion (Bacic *et al.*, 2006), pour aider à la prise de décision (Hattermann *et al.*, 2011). Pour inclure davantage les acteurs dans le processus de construction des scénarios, Ronfort *et al.* (2012) définissent les types de variables à inclure dans les scénarios avec des acteurs locaux, à partir desquelles les chercheurs construisent les scénarios *quantitatifs, exploratifs se référant à la situation initiale* (Ronfort, 2010). Lorsque les acteurs sont directement impliqués dans le processus de construction des scénarios narratifs, les scénarios quantitatifs peuvent être dérivés par les chercheurs à partir de différentes sources. Clavel *et al.* (2011) utilisent des enquêtes d'experts, construisant ainsi les scénarios à partir de données qualitatives individuelles. D'autres auteurs quantifient les scénarios narratifs construits lors d'ateliers de travail collectifs (ex. Nakicenovic and Swart, 2000 ; Rotmans *et al.*, 2000 ; Walz *et al.*, 2007). Des méthodes mixtes (Fagerstrom *et al.*, 2003a ; 2003b) et/ou itératives (Alcamo, 2008b ; Lippe *et al.*, 2011) peuvent également être utilisées. Par exemple, dans l'étude de Walz *et al.* (2007), les scénarios *exploratifs quantitatifs* sont construits à partir de scénarios narratifs explicités par des acteurs, à partir de l'identification des principales incertitudes et de la *situation de référence*. Cette étude, dont l'objectif initial était la construction et l'évaluation participatives de scénarios quantitatifs, a vu son objet changer vers le renforcement des capacités locales, du fait, entre autres, de la complexité du modèle et de la difficulté, récurrente, de quantification des scénarios par les acteurs. Dans ces approches où la quantification des scénarios narratifs est réalisée par les chercheurs, la méthode utilisée pour effectuer cette « traduction » est rarement présentée. Cela indiquerait, selon Leenhardt *et al.* (2012), que l'équipe de recherche « fait de son mieux » pour réaliser cette traduction.

D'après ces auteurs, le principal problème concerne la définition non consensuelle des concepts utilisés entre les chercheurs et les acteurs.

Pour accroître la participation dans la construction des scénarios quantitatifs à évaluer avec un modèle, Lippe *et al.* (2011) proposent et testent un processus de construction itératif. A partir de scénarios narratifs, les chercheurs construisent, à partir de la *situation de référence*, des scénarios *exploratifs quantitatifs*. Ces scénarios sont ensuite adaptés et révisés par les acteurs en ateliers de travail collectifs. Une autre méthode pour lier davantage scénarios narratifs et scénarios quantitatifs est proposée par van Vliet *et al.* (2010) : la « semi-quantification » des scénarios par les acteurs. L'utilisation de « cartes cognitives floues » (*Fuzzy Cognitive Maps*) permet à ces auteurs d'identifier les facteurs importants et les relations entre ces facteurs, puis de qualifier ces relations en termes d'impact (influence positive ou négative et force de cette relation en six classes). Cette méthode ne permet pas de construire des scénarios *per se* mais de (1) faciliter la compréhension du système et d'identifier et éclairer les possibles incohérences existant entre les actes des acteurs influençant le système, (2) fournir un cadre permettant de stimuler la réflexion des acteurs. De même, Clavel *et al.* (2011 ; 2012) proposent un outil facilitant la création et la simulation par des acteurs de scénarios spatialisés d'usage du sol (systèmes de culture et itinéraires techniques), dont les facteurs de changement ne sont toutefois pas forcément explicités. La gamme de scénarios explorable est limitée par l'outil, qui se réfère à la situation de référence (co-construite) et à des situations alternatives possibles disponibles dans une base de données.

Finalement, pour construire des scénarios quantitatifs à l'aide d'experts, Therond *et al.* (2009) proposent une procédure permettant de traduire le problème général en des scénarios décrits numériquement, en lien avec la chaîne de modèles utilisée pour l'évaluation des scénarios. Dans cette procédure, les modélisateurs et les décideurs publics traduisent la question en différentes composantes, imposés par les modèles. Ces composantes vont permettre de définir (1) la description narrative de la question ; (2) les hypothèses sur les tendances des facteurs externes à l'origine des changements ; (3) les options politiques ; (4) les contextes de gestion agronomiques et (5) une situation de référence et des scénarios (finaux) composés des trois composantes précédentes composantes (2 à 4). Ce processus permet une spécification numérique claire des scénarios sous contrainte des possibilités de l'outil pouvant impliquer une simplification des scénarios (Thérond *et al.*, 2009). Cette méthode est la seule, à notre connaissance, permettant de développer de manière participative des scénarios narratifs et quantitatifs. Elle requiert un dialogue et des interactions intensives avec les experts des politiques publiques et la définition par ceux-ci de la politique publique à analyser. Elle permet d'évaluer quantitativement les impacts des politiques publiques, mais, en impliquant uniquement les décideurs (et non pas ceux qui mettront en œuvre les décisions), ne permet pas d'appréhender la faisabilité technique, locale et l'acceptation sociétale de la politique étudiée (ex. découplage des aides de la Politique Agricole Commune (PAC)).

Conclusion partielle

De nombreuses méthodes existent pour construire des scénarios. Le choix d'une méthode va dépendre du type de scénario à définir, en particulier son caractère narratif ou quantitatif. Pour simuler les impacts d'un scénario, les approches analytiques peuvent être très utiles, mais requièrent des scénarios quantitatifs. Les approches participatives sont d'une grande utilité pour définir des scénarios adaptés à un contexte local, mais aboutissent le plus souvent à la construction de scénarios narratifs. Construire des scénarios à la fois narratifs et quantitatifs est un enjeu majeur des approches de construction de scénarios, pour lequel une seule méthode a été identifiée. Cette méthode est relative à la prise de décision publique définie par les décideurs eux-mêmes, n'étant ainsi liée qu'à une échelle « macro ». A notre connaissance, aucune approche participative de construction de scénarios, narratifs et quantitatifs, liant différentes échelles de contexte, pour leur évaluation par un modèle n'a aujourd'hui été proposée, quand la question à traiter n'est pas issue des acteurs locaux et qu'un modèle biophysique (complexe) est disponible et non modifiable.

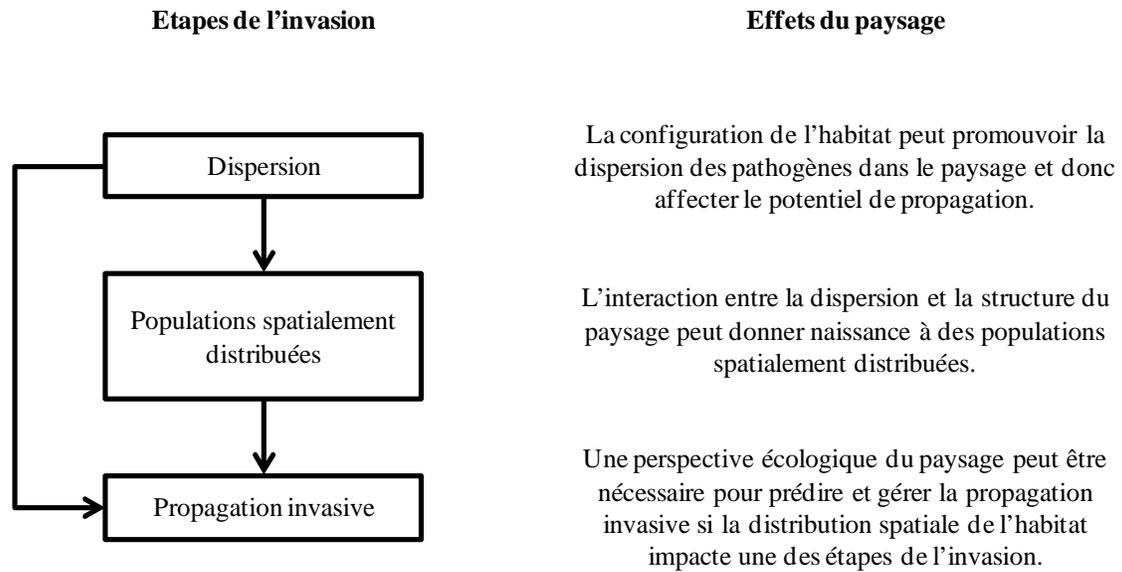


Figure 1.8. Impacts de la structure du paysage sur la propagation invasive d'un agent pathogène (source : adapté de With, 2002)

3. Comment analyser des scénarios supraparcellaires de systèmes de culture pour gérer un bioagresseur ou un problème de flux ?

L'étude d'un problème, dont au moins un des processus comporte un flux à une échelle spatiale plus large que la parcelle, requiert de considérer une unité géographique élargie. Plusieurs processus, ayant des impacts environnementaux ou agricoles, se jouent à ces échelles : processus érosifs en lien avec l'écoulement des flux aquifères ou superficiels, migration d'espèces mobiles (insectes, carabes), dispersion par le vent de pollens et d'agents pathogènes, etc. L'échelle à appréhender est alors le territoire/paysage agricole, composé de plusieurs champs. L'étendue du territoire à prendre en compte dépend des processus considérés. Comme nous l'avons vu précédemment, la caractérisation du territoire agricole et de ses impacts sur un bioagresseur requiert également l'explicitation des systèmes de culture et de la pression du bioagresseur. Ces différents éléments sont illustrés dans cette partie.

3.1. De l'échelle de la parcelle à l'échelle du territoire agricole

3.1.1. Définition du paysage agricole

Plusieurs définitions du paysage existent dans la littérature, en lien avec la thématique traitée et l'échelle à laquelle elle est définie. Burel et Baudry (1999) définissent le paysage comme « un niveau d'organisation des systèmes écologiques, supérieur à l'écosystème ; il se caractérise essentiellement par son hétérogénéité et par sa dynamique gouvernée pour partie par les activités humaines ». Cette hétérogénéité peut être définie spatialement et/ou temporellement (Dunning *et al.*, 1995).

Dans un paysage agricole, l'hétérogénéité est liée à la diversité des cultures et des pratiques agricoles associées, qui s'organisent dans l'espace (assolement, mosaïque) et dans le temps (succession de cultures) (Burel et Baudry, 2005). Cette organisation a un effet nul ou faible sur la structure du paysage, i.e. la forme et la taille des parcelles et leur arrangement spatial (Baudry et Papy, 2001). Le paysage agricole est aussi caractérisé par ses éléments (semi-) naturels, comme par exemple les forêts et les haies, qui concourent à définir la connectivité du paysage agricole (Burel et Baudry, 2005). L'influence de ces éléments (semi-)naturels (non-cultivés) va dépendre de la thématique étudiée. Cette influence peut être élevée pour des bioagresseurs dont une partie du cycle de vie se déroule dans ces éléments (ils sont une partie de leurs habitats³⁰ : exemple des méligèthes et de ses parasitoïdes, Rusch *et al.*, 2011). Elle est faible pour des bioagresseurs dont le cycle de vie ne les nécessite pas (exemples de champignons pathogènes : rouille brune du blé, phoma du colza). Ces éléments sont plus stables dans le temps, bien qu'indirectement influencés par les pratiques agricoles. Ces différents éléments définissent la composition du paysage.

3.1.2. Influence des caractéristiques paysagères sur la gestion

En lien avec la connectivité d'un paysage agricole se définit la fragmentation de l'habitat (With, 2002), qui va impacter la dynamique des populations pathogènes (Hanski, 1998 ; Figure 1.8). Le paysage va ainsi être composé de « patchs » plus ou moins favorables à la survie ou à la reproduction de l'agent pathogène considéré (With, 2002). Ces patchs peuvent représenter des sources ou des cibles (puits) pour les bioagresseurs. Deux composantes de l'hétérogénéité spatiale sont donc à considérer : le facteur d'intérêt (i.e. l'habitat) et sa variabilité dans l'espace (i.e. connectivité, fragmentation) (Li et Reynolds, 1994).

La dispersion de l'agent pathogène peut être active (ex. insecte) ou passive (ex. spores dispersées par le vent). L'échelle de dispersion va dépendre des caractéristiques de l'agent pathogène ou du flux étudié, qui va donc déterminer l'échelle spatiale à prendre en compte entre les parcelles sources et les

³⁰ Un habitat est par définition relatif au bioagresseur considéré.

parcelles cibles. La localisation de l'habitat, des sources et des puits à l'intérieur d'un paysage (aléatoire, agrégé) va influencer les flux de bioagresseurs (Skelsey *et al.*, 2005). Pour certains agents pathogènes, la localisation de l'habitat doit être caractérisée sur plusieurs années pour prendre en compte l'ensemble des processus du cycle de vie (ex. régulation des méligèthes, Thies *et al.*, 2008 ; récurrence pluriannuelle de l'épidémie pour le phoma du colza). Les flux d'agents pathogènes et les dommages qu'ils vont causer vont ainsi dépendre de la localisation pluriannuelle des sources et des cibles et donc de l'organisation spatiale des systèmes de culture.

Pour caractériser la représentation spatiale des sources et/ou des cibles des bioagresseurs, l'analyse de la composition du paysage peut être réalisée à l'aide de différentes métriques paysagères (ex. fréquence de l'habitat, distance entre deux habitats). La représentation spatiale de ces sources peut être définie à plusieurs échelles, depuis l'environnement proche (ex. parcelles environnantes) jusqu'à une échelle de plusieurs kilomètres (ex. Rusch *et al.*, 2011). Les variables structurelles du paysage (ex. taille, forme des champs, orientation) vont configurer le paysage par rapport à un bioagresseur (Skelsey *et al.*, 2005). Selon ces caractéristiques, la composition du territoire agricole (ex. fréquence d'une culture, d'une variété et leurs localisations) peut engendrer différentes conséquences sur les flux de l'organisme considéré (ex. flux de gènes, Viaud *et al.*, 2008; flux de spores dans le cas de la durabilité des résistances, Skelsey *et al.*, 2010).

3.2. Caractérisation des stratégies agricoles supraparcellaires et de leurs impacts

3.2.1. Caractériser les systèmes de culture

Par définition, un paysage agricole, partiellement construit et géré par l'homme, est dynamique (Burel et Baudry, 2005). Pour caractériser cette dynamique, l'assolement³¹ peut être défini à différentes échelles, selon la thématique étudiée. La première échelle est l'exploitation agricole, lieu principal de prise de décision (ex. Stone *et al.*, 1992). Une échelle supérieure peut être prise en compte, notamment pour aborder des thématiques collectives, comme l'utilisation de ressources naturelles (ex. Rounsevell *et al.*, 2003). L'assolement comporte : (1) une dimension temporelle, avec la description annuelle des surfaces occupées par les différentes cultures (Wijnands, 1999) et (2) une dimension spatiale, avec la description de la localisation des différentes cultures au sein du paysage agricole (Dury *et al.*, 2012). Ces deux caractéristiques sont nécessaires pour appréhender d'une part la qualité/quantité d'habitat disponible pour les organismes considérés : les surfaces, et d'autre part la structure de ce paysage, et donc sa connectivité (intra et interannuelle) : l'allocation des cultures. Le paysage peut donc être décrit en termes de composition (Figure 1.9a) et de structure/allocation (Figure 1.9b), un type de culture ou un type de variété pouvant caractériser l'habitat nécessaire à un bioagresseur pour sa survie et/ou sa reproduction.

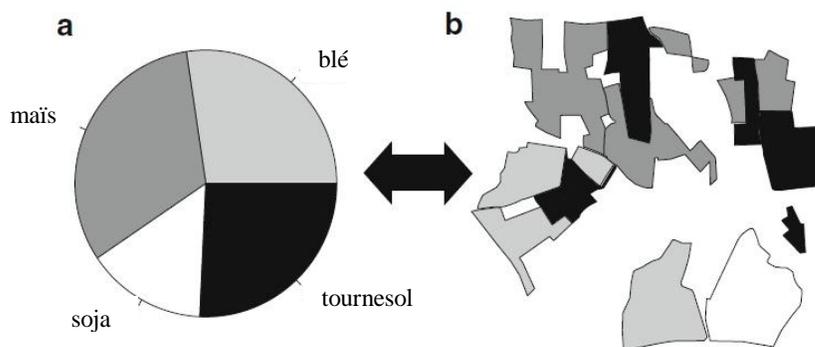


Figure 1.9. Définition de l'assolement : la proportion des surfaces par culture (a) et l'allocation spatiale des cultures (b) sont les deux éléments emboîtés d'un assolement (source : Dury *et al.*, 2012)

³¹ « Cropping plan » en anglais

Outre le type de culture et sa localisation spatiale au sein du paysage agricole étudié, d'autres variables sont couramment étudiées pour caractériser les systèmes de culture dans le temps et dans l'espace vis-à-vis d'une thématique à composante spatiale. L'une de ces variables est le type de variété (Le Bail *et al.*, 2010 ; Skelsey *et al.*, 2010). Les pratiques culturales peuvent également être utilisées (Colbach *et al.*, 2005 ; Colbach, 2009 ; Rusch *et al.*, 2012). Finalement, certaines caractéristiques climatiques impactant la dispersion, telles que la direction et l'intensité du vent, peuvent être utilisées pour spécifier la connectivité d'un paysage agricole, selon le facteur de risque étudié (Le Bail *et al.*, 2010 ; Viaud *et al.*, 2008). L'efficacité des organisations spatiales est susceptible de dépendre de l'échelle de dispersion de l'agent pathogène, en lien avec l'échelle de l'hétérogénéité des populations hôtes (culture, variété) (Skelsey *et al.*, 2010).

3.2.2. Caractériser la pression d'un bioagresseur

En environnement agricole, les populations de bioagresseurs sont composées de populations fragmentées, résultant de l'absence de continuité des habitats de l'organisme due aux structures agraires et aux systèmes de culture présents (IOBC/OILB, 1973 in Ferron et Deguine, 2005 ; Figure 1.8). L'ensemble de ces populations est considéré comme une métapopulation, qui peut être définie à plusieurs échelles. Ce concept, initialement introduit par Levins (1969), caractérise la métapopulation comme un ensemble de populations locales, qui occupent un réseau de taches d'habitats (*patches*), elles-mêmes localisées dans une matrice non habitable par le bioagresseur considéré. Par exemple, Aubertot *et al.* (2006) définissent la population de pathogènes à l'échelle du champ cultivé et la métapopulation comme l'ensemble régional des populations résultant de ces champs individuels. La métapopulation correspond alors à l'assemblage de populations locales présentes dans des habitats spatialement distincts (Moilanen et Hanski, 1998).

La caractérisation d'un bioagresseur peut être qualitative (ex. type de population, caractérisée par l'âge ou les caractéristiques génétiques des individus) ou quantitative (ex. nombre de parasites). Elle dépend du bioagresseur étudié, et peut être définie quantitativement par son incidence et/ou sa sévérité³², ou être liée à des gains/pertes de rendement (van den Bosch et Gilligan, 2003).

3.2.3. Echelles et moyens d'analyses

Deux types d'échelle spatiale et temporelle doivent être prises en compte pour comprendre les dynamiques du bioagresseur et ainsi raisonner son contrôle: (1) l'échelle des dynamiques de l'hôte (ex. la culture d'une variété particulière) et (2) l'échelle des dynamiques du bioagresseur. Utiliser plusieurs échelles spatiales pour expliquer un même processus peut être pertinent pour expliciter le risque lié à la distribution des sources/puits de bioagresseurs dans le paysage agricole (ex. Rusch *et al.*, 2012). Les indicateurs caractérisant les pratiques et la pression en bioagresseurs peuvent ainsi être définis à différentes échelles croissantes. La prise en compte d'une zone circulaire (*buffer*) dont le périmètre dépend des caractéristiques du paysage et du bioagresseur considéré est souvent mobilisée pour étudier l'influence du paysage proche sur le bioagresseur (ex. Rusch *et al.*, 2011 ; 2012). La prise en compte de la région permet de caractériser une pression en bioagresseurs locale (ex. Colbach *et al.*, 2009b).

La modélisation spatialement explicite est un outil très utile pour étudier les dynamiques des populations pathogènes et les phénomènes se produisant à l'échelle du paysage (Dunning *et al.*, 1995). Ces modèles permettent d'évaluer l'influence du paysage sur les populations d'organismes, permettant ainsi de développer et d'évaluer des organisations des usages des terres à une échelle régionale

³² L'incidence correspond à la proportion de plantes atteintes, alors que la sévérité de la maladie est caractérisée par la quantité de maladie sur un organe.

(Dunning *et al.*, 1995). Lorsque l'on cherche à évaluer l'impact d'une certaine utilisation locale des terres agricoles, le choix et la taille des unités spatiales utilisées par le modèle d'évaluation sont des caractéristiques très importantes (Hijmans et van Ittersum, 1996). Selon ces auteurs, ce niveau doit être déterminé par l'objectif de l'étude, l'échelle appropriée pour la synthèse des résultats, ainsi que l'hétérogénéité des unités agricoles dans le système étudié.

3.3. Application en épidémiologie végétale et à la durabilité des résistances

En épidémiologie végétale, concevoir des stratégies à l'échelle du paysage agricole, notamment en termes de proportion et de localisation des variétés, n'est pas une idée récente (Mundt et Brophy, 1988 ; Zadoks et Kampmeijer, 1977). L'épidémiologie du paysage³³ pourraient permettre d'améliorer la compréhension et la prédiction du risque et de l'incidence d'une maladie (Ostfeld *et al.*, 2005). Plantegenest *et al.* (2007) soulignent cependant la sous-exploitation de l'épidémiologie du paysage pour l'exploration de nouvelles stratégies, malgré l'influence forte des caractéristiques du paysage sur la propagation des maladies des plantes. Ces auteurs soulignent différents aspects de l'épidémiologie végétale qui pourraient largement bénéficier d'une telle approche : (1) l'influence de la composition du paysage sur la pression parasitaire globale ; (2) l'influence de l'hétérogénéité du paysage sur les dynamiques des agents pathogènes ; et (3) l'influence de la structure du paysage sur la dispersion des agents pathogènes. Ainsi, des modèles épidémiologiques détaillés reflétant les dynamiques spatiales et temporelles de la propagation d'une épidémie peuvent être utilisés pour hiérarchiser des stratégies de contrôle (Gilligan *et al.*, 2007), la réalisation d'études empiriques n'étant pas une option du fait des échelles impliquées (Parnell *et al.*, 2006).

Le potentiel de cette approche paysagère, spatialement explicite ou non, a été montré dans différentes études récentes (Fabre *et al.*, 2012 ; Gilligan *et al.*, 2007 ; Margosian *et al.*, 2009 ; Papaïx *et al.*, 2011 ; Parnell *et al.*, 2006, Skelsey *et al.*, 2010). Certaines de ces études (Gilligan *et al.*, 2007 ; Skelsey *et al.*, 2009) soulignent l'impact de l'échelle considérée pour l'efficacité des stratégies de contrôle. Cependant, dans ces travaux, la seule composante prise en compte pour caractériser l'hôte (i.e. la plante) est la variété (et le cas échéant son niveau de résistance). Seuls Skelsey *et al.* (2009b) prennent en compte indirectement la rotation (fraction de l'hôte) et directement les pratiques culturales (uniquement les produits fongicides).

Pour accroître la durabilité des résistances, les conseils élaborés jusqu'à maintenant restent relativement généraux, se basant principalement sur l'utilisation d'une ou plusieurs résistances au sein d'une variété ou d'un peuplement (Finckh *et al.*, 2000 ; Gladders *et al.*, 2006 ; McDonald et Linde, 2002), voire la proportion d'utilisation d'un type de résistance (Pietravalle *et al.*, 2006). Réfléchir à l'utilisation des variétés résistantes dans les rotations (dimension temporelle) et dans l'espace (échelle régionale par exemple), en combinaison avec des pratiques culturales ayant une influence sur le cycle de la maladie, apparaît donc une approche prometteuse pour mobiliser les leviers complémentaires nécessaires à la gestion intégrée de la durabilité (Aubertot *et al.*, 2006b ; Gladders *et al.*, 2006 ; Mundt *et al.*, 2002). Cette approche permettrait de mieux prévoir et gérer le risque, par le développement de stratégies spatio-temporelles intégrées des systèmes de culture.

³³ L'épidémiologie du paysage est définie par Raisen (2010) comme la « description de la manière dont interagissent spatialement les dynamiques temporelles de l'hôte, du vecteur et des populations pathogènes dans un environnement permettant la transmission ».

Conclusion partielle

La structure et la composition du paysage peuvent influencer la gestion d'un problème dont au moins un des processus à son origine requiert la prise en compte d'une échelle plus large que la parcelle. La caractérisation du paysage, qui doit dépendre de la thématique étudiée, peut comprendre des éléments décrivant la structure « fixe » (ex. taille et organisations des parcelles) et une composante plus variable, décrite spatialement et temporellement. Celle-ci, définie en fonction du bioagresseur étudié, comporte la description des cultures présentes et des pratiques associées. En épidémiologie végétale, une approche paysagère du territoire agricole peut apporter des éléments de compréhension des dynamiques des bioagresseurs. Cependant, cette approche a été très peu utilisée, en particulier pour identifier et analyser des stratégies de systèmes de culture, combinant cultures et pratiques agricoles dans le temps et dans l'espace, efficaces vis-à-vis de la gestion d'un bioagresseur.

Cette échelle étant difficilement accessible par l'expérimentation *in situ*, l'utilisation de modèles spatialement explicites apparaît bien adaptée pour estimer les effets associés à des modifications dans les systèmes de culture et à leur organisation spatiale sur la gestion des bioagresseurs.

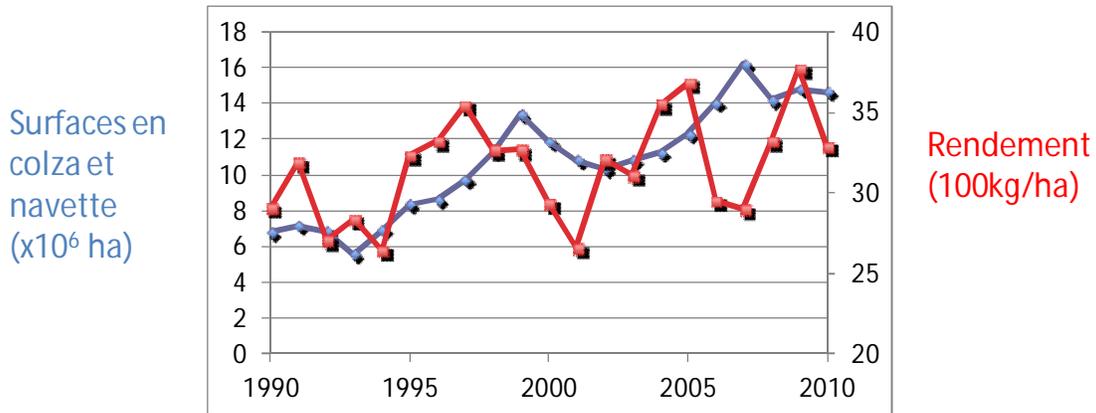


Figure 1.10. Evolution des surfaces et des rendements de colza de 1990 à 2010 (source : Agreste, 2011).

Courbe en bleu : surfaces cultivées ; courbe en rouge : rendements.

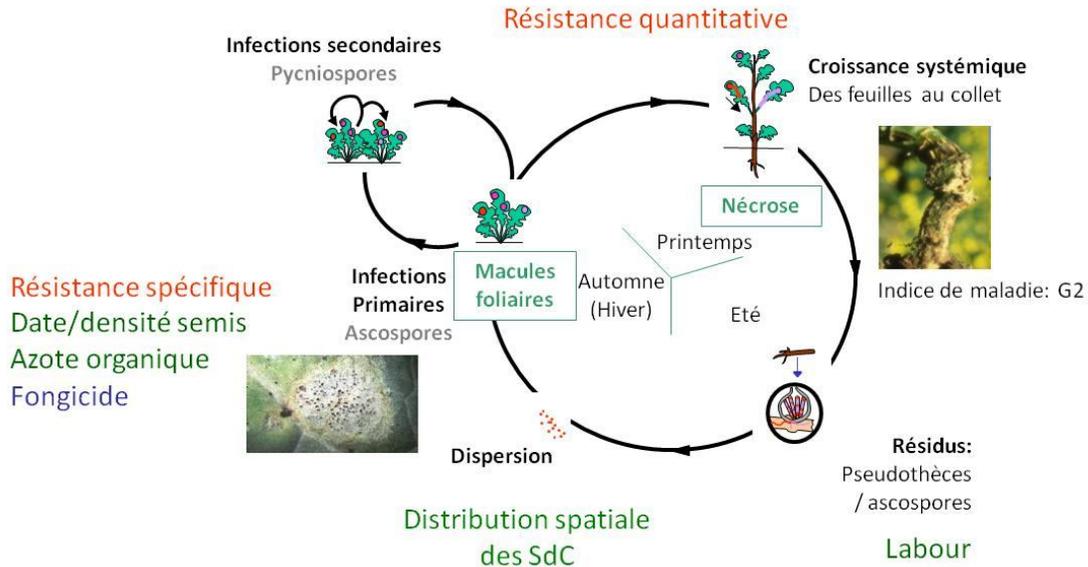


Figure 1.11. Cycle du phoma du colza et moyens de gestion (adapté de Aubertot *et al.*, 2004a ; Hall, 1992 ; West *et al.*, 2001)

en rouge : lutte génétique ; en bleu : lutte chimique et en vert : lutte culturale

4. Le cas d'étude utilisé dans cette démarche : le phoma du colza

La thématique choisie dans le cadre de cette thèse pour la construction et l'analyse de scénarios d'évolution des pratiques agricoles à une échelle spatiale supraparcellaire est le phoma du colza. Ce pathosystème est décrit dans cette partie.

4.1. La culture du colza

La culture du colza, très fréquente dans les assolements du Nord de la Loire est sujette à de nombreux bioagresseurs, alors qu'elle présente des intérêts agronomiques importants. Elle permet une bonne valorisation de l'azote à l'automne (Dejoux *et al.*, 2003), une couverture du sol en hiver permettant de limiter l'érosion (Marquard et Walker, 1995) et la lixiviation des nitrates vers les nappes, et présente un système racinaire engendrant un bon état structural du sol. Elle constitue également un bon précédent au blé, via la production de biocides contre certains organismes nuisibles et la rupture des cycles des bioagresseurs. La culture du colza présente également des atouts face au changement climatique : du fait de ses besoins photopériodiques et vernalisants, le cycle du colza conserverait une durée non pénalisante pour le rendement si le climat se réchauffait (sous réserve de choix variétal adapté) (Brisson et Levrault, 2010).

L'évolution de la PAC et le développement des biocarburants ont contribué à une augmentation considérable des surfaces allouées au colza en France (Figure 1.10). Cette expansion des surfaces s'accompagne d'un développement important des bioagresseurs liés à cette culture. La lutte contre ces bioagresseurs repose actuellement principalement sur l'utilisation de produits phytosanitaires, qui implique un IFT³⁴ élevé pour cette culture en France (environ 6 en 2006, source : Agreste Primeur, avril 2010). Cette culture est en effet sensible à de nombreux adventices, ravageurs (mouche du chou, charançons, méligèthes, pucerons) et maladies (sclérotinia, oïdium, cylindrosporiose) dont le phoma. Le phoma du colza est l'une des maladies les plus préjudiciables au colza, présente partout où le colza est cultivé (Hall, 1992; Fitt *et al.*, 2006 ; West *et al.*, 2001). Cette maladie peut impliquer, selon les années, de 5 à 20% de pertes de rendement de la production nationale française (Aubertot *et al.*, 2004a).

4.2. Description du pathosystème

L'agent pathogène *Leptosphaeria maculans* (anamorphe *Phoma lingam*) est un champignon ascomycète hétérothallique responsable du phoma des crucifères, particulièrement dommageable économiquement sur le colza (Fitt *et al.*, 2006). Cette maladie présente un cycle épidémique comprenant des processus polyétiques³⁵ (Figure 1.11). La maladie est initiée à l'automne par la production d'ascospores³⁶, libérées par des pseudothèces³⁷ produits par le champignon sur les résidus de colza infectés laissés au sol, sous conditions de lumière, de température et d'humidité (Gabrielson, 1983 ; Lacoste, 1963 ; Williams, 1992). Ces ascospores sont libérées lors d'épisodes pluvieux et sont dispersées par le vent (Hall, 1992 ; West *et al.*, 2001) sur de larges distances, jusqu'à 5-8 km (Bokor *et al.*, 1975). La période de libération et de dispersion des ascospores s'étale de la fin de l'été jusqu'à l'automne, à la période où de jeunes plants de colza peuvent être présents dans les parcelles (West *et al.*, 2001). Les ascospores se déposant sur les feuilles de colza vont causer des macules sur les feuilles

³⁴ IFT : l'Indice de Fréquence de Traitement est un indicateur de l'intensité de l'utilisation des produits phytosanitaires. Il représente le nombre de traitements réalisés à la dose homologuée et permet ainsi la comparaison inter-culture (Champeaux, 2006).

³⁵ Polyétique : qualifie une épidémie récurrente d'une année sur l'autre.

³⁶ Les ascospores correspondent à l'inoculum primaire.

³⁷ Les pseudothèces sont les fructifications sexuées contenant les ascospores.

et les cotylédons, via les stomates ou des blessures (Hammond *et al.*, 1985). Ces macules correspondent aux infections primaires de la maladie, sous conditions d'humidité et de température (Biddulph *et al.*, 1999). Au niveau des macules, des pycnides³⁸ vont se former et libérer des pycnidiospores³⁹, qui vont, à courte distance (i.e. sur la même plante et sur les plantes voisines), être dispersées par la pluie et engendrer des infections secondaires (Travadon *et al.*, 2007). Malgré ces infections secondaires, dont l'importance dans le cycle épidémique de la maladie est mal connue (Li *et al.*, 2006a), l'observation des gradients de maladie suggère que la maladie peut être considérée comme monocyclique. L'effet des infections secondaires dans le cycle est en effet très faible par rapport aux infections primaires, responsables de l'essentiel de la maladie (Hall, 1992 ; Hammond et Lewis, 1986 ; Salam *et al.*, 2007).

Les macules sont donc le point de départ de l'infection. Pendant l'hiver et le printemps suivant l'infection primaire, le champignon, sous forme de mycélium, va croître dans la tige de manière systémique jusqu'au collet. Au niveau du collet, le champignon va envahir et détruire les cellules du cortex de la tige, provoquant le deuxième symptôme de la maladie : la nécrose du collet. Celle-ci apparaît tardivement et n'est pas nécessairement visible avant la récolte, sauf dans les cas les plus préjudiciables pour le rendement où la nécrose peut provoquer la verse du colza. La nécrose va par ailleurs altérer les nutriments hydrique et minérale du colza, impliquant des pertes de rendement (McGee et Emmett, 1977). La sévérité de la maladie à l'échelle du champ est caractérisée par un indice de sévérité de la maladie (DI) : la note G2. Cet indice intègre le nombre de plantes présentant différentes notes de sévérité de la nécrose et caractérise la maladie à l'échelle de la parcelle (Pierre et Regnault, 1982 ; Aubertot *et al.*, 2004c):

$$G2 = \frac{\sum_{i=2}^6 [2(i-2)+1]n_i}{\sum_{i=1}^6 n_i} \text{ avec } n_i \text{ le nombre de plantes notées affectées à la classe de nécrose } i^{40}.$$

Equation 1.1. Calcul de la note G2

Après la récolte, pendant l'interculture, le champignon va survivre sous forme de mycélium sur les résidus infectés de la saison précédente. La quantité d'inoculum primaire, les ascospores, est donc directement en lien avec la sévérité de la maladie lors de la saison culturale précédente (Lô-Pelzer *et al.*, 2009).

4.3. Leviers pour la gestion

L'utilisation de variétés résistantes (Figure 1.11) est la principale méthode de lutte efficace contre le phoma du colza (Delourme *et al.*, 2006). Ces variétés peuvent porter des résistances spécifique et/ou quantitative. L'utilisation intensive de la méthode de lutte génétique peut compromettre le contrôle durable de la maladie. Les résistances spécifiques peuvent être rapidement contournées (Rouxel *et al.*, 2003 ; Figure 1.12) si la population pathogène s'y adapte. Ce contournement dépend des caractéristiques de la population pathogène et du fond génétique des variétés (i.e. présence et type de résistance quantitative). La gestion de la population pathogène (taille et structure) est donc cruciale pour contrôler le phoma du colza. De plus, les facteurs de résistance au phoma présents dans les variétés cultivées sont peu nombreux, en lien avec le temps et les efforts considérables nécessaires à la création d'une nouvelle variété (Pink et Puddephat, 1999). Concernant la résistance spécifique, seul un gène de résistance actuellement commercialisé (Rml7) reste à l'heure actuelle non contourné par le parasite (du fait *a priori* du fond de résistance quantitative des variétés dans lesquelles ce gène a été

³⁸ Les pycnides sont les fructifications asexuées contenant les pycnidiospores.

³⁹ Les pycnidiospores correspondent à l'inoculum secondaire.

⁴⁰ Les classes de nécrose, au nombre de six, sont définies en fonction de la proportion de la surface de la section transversale du collet nécrosée de la plante considérée.

introduit). Après une l'introduction des variétés Rlm7 en 2004 et leur culture sur 20-25% des surfaces en région Centre, la population pathogène locale a évolué, avec un pourcentage d'individus virulents avrlm7 estimé en 2011 entre 9 et 17% de la population totale de *Leptosphaeria maculans* (échantillonnage sur plusieurs communes du Cher et de l'Indre, Pinochet *et al.*, 2012). Il est donc nécessaire de chercher des solutions pour préserver dans le temps et dans l'espace l'efficacité des gènes de résistance au phoma du colza.

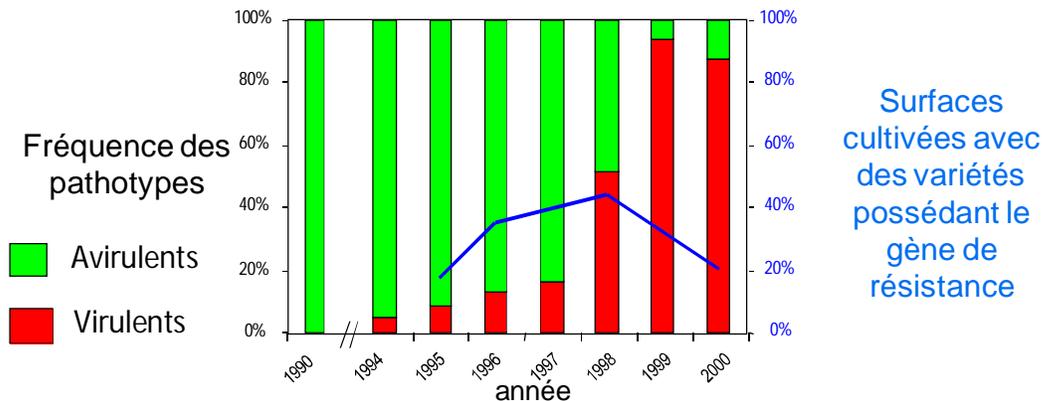


Figure 1.12. Evolution temporelle des fréquences des pathotypes avirulents (Avrlm⁴¹) et virulents (avrlm) sur le gène de résistance spécifique Rlm1 et des surfaces cultivées avec des variétés porteuses de ce gène (source : Rouxel *et al.*, 2003)

D'autres leviers sont également disponibles : le levier agronomique et le levier chimique (Figure 1.11). Les principales pratiques culturales permettant de favoriser la durabilité des résistances au phoma du colza, en agissant sur le cycle de l'agent pathogène, sont :

- le labour : en enfouissant les résidus par le travail du sol, leur quantité en surface sera diminuée (Scheider *et al.*, 2006) et leur décomposition sera accélérée (Turkington *et al.*, 2000). Le labour permet donc de limiter la quantité d'inoculum primaire.
- la date de semis : elle conditionne le stade phénologique de la culture à la période de libération des spores de *Leptosphaeria maculans* à partir des résidus (Aubertot *et al.*, 2004a). Son choix permet de limiter la synchronisation du stade sensible de la culture avec celle de l'arrivée des spores, le colza étant particulièrement sensible avant le stade 6 feuilles (Brunin et Lacoste, 1970).
- la densité de semis et la gestion de l'azote automnal : elles ont un effet sur la surface foliaire disponible lors de l'arrivée des spores sur le colza (Aubertot *et al.*, 2004a). Une surface foliaire moindre permet de limiter les spores interceptées au moment des pics d'émission des spores.

Concernant la lutte chimique, le choix du moment et de la dose à appliquer est critique et délicat à évaluer (Steed *et al.*, 2007 ; West *et al.*, 2002). La faible rémanence des matières actives (Gladders *et al.*, 2006) et la longue durée de la période de risque limite l'efficacité des fongicides.

⁴¹ Avrlm et avrlm correspondent à la notation de la virulence sur un gène de résistance spécifique du pathogène *Leptosphaeria maculans*, expliquant le « lm » ajouté après l'« avr » présenté dans la Figure 1.1.

Pour limiter les risques d'infection à l'échelle parcellaire (i.e. due aux résidus encore présents dans le champ), un délai de retour du colza de 4 ans minimum est recommandé (West *et al.*, 2001). A l'échelle supra-parcellaire, un éloignement de minimum 500 mètres est recommandé entre une parcelle ayant des résidus infectés à sa surface et une parcelle cultivée avec du colza l'année culturale suivante (Marcroft *et al.*, 2004). Les agents pathogènes du phoma du colza étant dispersés par le vent, la localisation des parcelles émettrices et réceptrices est un levier pour le contrôle de la maladie. En particulier, la localisation des variétés sensibles va caractériser les habitats possibles pour le pathogène. Cet habitat sera atteint en fonction de la distance à parcourir et de l'intensité et de la direction du vent.

Conclusion partielle

Le cycle de l'agent pathogène responsable du phoma du colza et son mode de dispersion (dispersion longue distance, survie à l'intersaison du champignon) requièrent de considérer une échelle spatiale supraparcellaire et une échelle temporelle supra-annuelle pour sa gestion.

Le choix et la localisation spatiale des différentes variétés (habitats pour les différents types de spores) et des pratiques jouent un rôle important sur la taille et la structure génétique des populations pathogènes : ces facteurs apparaissent donc comme un levier important pour gérer le phoma du colza et la durabilité des résistances variétales.

Les facteurs qui ont une forte influence sur la maladie dépendent du contexte agricole local et sont déterminés par les acteurs choisissant ou influençant les choix des systèmes de culture, en particulier de la fréquence du colza dans le territoire, des choix variétaux et des itinéraires techniques appliqués au colza. Le choix variétal reste le premier moyen de gestion de la maladie. Cependant les résistances sont parfois peu durables et leur nombre est limité. La gestion des variétés, par une utilisation collective de la ressource génétique, requiert de modifier les itinéraires techniques, ainsi que certains éléments de fonctionnement des filières (Butault *et al.*, 2010). Des stratégies collectives impliquant des changements techniques à plusieurs échelles spatiales et temporelles pourraient être à même de prolonger la durée d'efficacité des résistances et ainsi de limiter les pertes de rendement liées au phoma du colza.

Ce pathosystème est donc un cas d'étude pertinent pour étudier la durabilité des résistances par le déploiement spatio-temporel des variétés et des pratiques, défini par les acteurs locaux.

5. Questions et démarche de recherche

Au vu des éléments bibliographiques mis en lumière dans la première partie de ce document, la gestion de certains bioagresseurs nécessite de réfléchir à l'utilisation des leviers de contrôle à des échelles supérieures à la parcelle et à l'année. Construire une organisation spatiale des systèmes de culture requiert de se placer à l'échelle du territoire agricole. Pour identifier des organisations du territoire agricole permettant de lutter durablement contre le phoma du colza, il est nécessaire d'identifier les leviers efficaces pouvant être utilisés localement. L'identification de ces leviers et de leurs organisations temporelle et spatiale peut bénéficier d'une démarche participative locale. En effet, la mobilisation et l'organisation de ces leviers est réalisée par les gestionnaires du territoire ayant un effet sur le choix des pratiques agricoles. Ces gestionnaires se situent à différents niveaux de la chaîne de production agricole (Coléno, 2008 ; Miraglia *et al.*, 2004). Les agriculteurs sont les décideurs des cultures, de leur allocation et des pratiques culturales (Bacic *et al.*, 2006), participant ainsi à l'organisation du paysage (Primdahl, 1999). Leurs choix peuvent cependant être orientés voire contraints (Bacic *et al.*, 2006) par l'organisation des filières locales, en particulier des organismes de collecte et de stockage (Coléno *et al.*, 2009 ; Hannachi, 2011). Ces organismes sont eux-mêmes dépendants de la création variétale par les semenciers, en amont du choix des pratiques agricoles. Un autre type de contrainte pour le choix des pratiques agricoles concerne le volet réglementaire, imposant certaines obligations, comme par exemple des contraintes sur la gestion des repousses de colza (Directive Nitrates ; Directive Cadre Eau). La composition et l'organisation des systèmes de culture et des pratiques locaux peuvent ainsi dépendre des différents gestionnaires du territoire agricole, dont les actions et possibilités peuvent conditionner les leviers mobilisables pour la gestion d'un bioagresseur. La composition et l'organisation spatiale de ces systèmes de culture, ainsi que leurs possibles modifications, vont ainsi dépendre des contextes politiques, économiques et sociaux passés, actuels et futurs, par nature incertains.

L'objectif de ce travail est donc d'étudier les effets de la configuration et de la composition des systèmes de culture à l'échelle d'un petit territoire sur l'évolution des populations de *Leptosphaeria maculans* et les conséquences agronomiques de cette évolution. **L'objet principal de recherche de cette thèse porte sur la construction participative et l'analyse de scénarios de systèmes de culture spatialisés, incluant du colza, sur la durabilité des résistances et la gestion du phoma du colza, ces scénarios étant décrits de manière quantitative, leurs hypothèses étant explicitées de manière narrative.**

Pour construire ces stratégies d'organisation, dont l'évaluation est réalisée à l'aide d'un outil analytique, une approche scénario est utilisée, dont la résultante devra être quantitative. Cette thèse a donc deux objectifs majeurs : (1) construire et mettre à l'épreuve une méthode de construction, reproductible et générique, de scénarios de systèmes de culture spatialisés ; (2) analyser la diversité de ces scénarios, dans différents terrains d'étude, pour mettre en lumière les caractéristiques des systèmes de culture⁴² spatialisés les plus à même de gérer le bioagresseur étudié, ici le phoma du colza. Nous chercherons ainsi à répondre à la question suivante : **comment concevoir et évaluer des scénarios de gestion spatiale des systèmes de culture pour gérer durablement le phoma du colza, en tenant compte d'un contexte local du territoire considéré (cultural, paysager, structuré par des acteurs)?**

⁴² Les systèmes de culture seront ici uniquement caractérisés par les éléments ayant un impact sur la gestion du phoma du colza, i.e. l'occurrence du colza dans la rotation, les itinéraires techniques associés à cette culture et la date de semis du suivant (qui a des conséquences, le cas échéant, sur les résidus de colza restés au sol).

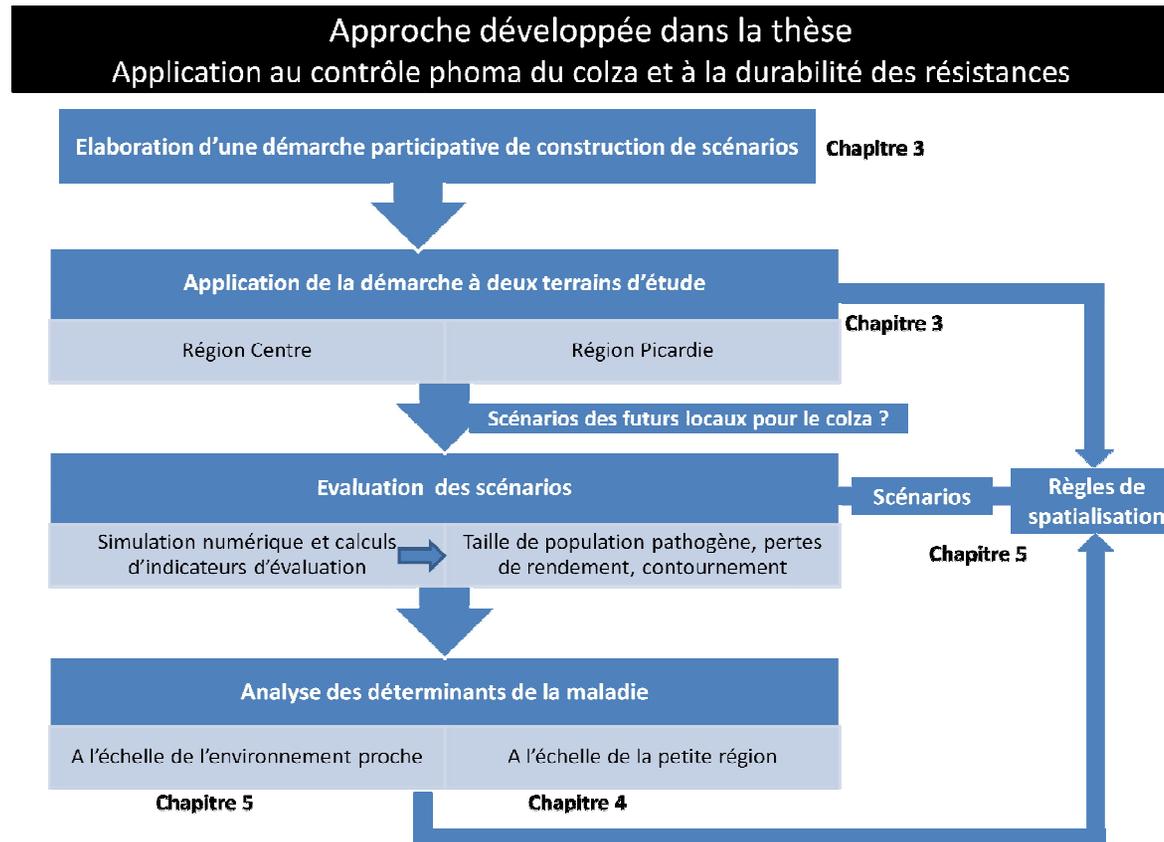


Figure 1.13. Schéma illustrant la démarche générale de ce travail de thèse et les questions de recherche abordées dans les différents chapitres (les questions de recherche sont définies dans le texte).

L'objet de la recherche est donc à l'interface entre une visée méthodologique (méthode de construction de scénarios quantitatifs sous hypothèses narratives) et une visée opérationnelle (scénarios efficaces vis-à-vis de la maîtrise du phoma, en fonction des caractéristiques régionales). La structuration du territoire agricole par ses acteurs, leurs stratégies et leurs moyens d'action, peuvent différer d'un territoire à l'autre. Du fait des différences en termes de contextes locaux paysager, pédoclimatique et social, deux terrains d'étude seront étudiés dans cette thèse.

Sur la base de la revue bibliographique présentée précédemment, nous avons choisi de co-construire ces scénarios, avec des acteurs agissant (à l'échelle locale) directement ou in-directement sur les facteurs qui composent lesdits scénarios. Ces scénarios sont ensuite analysés à l'aide d'un modèle spatialement explicite (SIPPOM-WOSR, Lô-Pelzer *et al.*, 2010a). La combinaison d'une approche participative pour la définition de scénarios et l'utilisation d'un modèle numérique permettra **l'identification de scénarios (réalistes ou plus exploratoires), imaginés par les acteurs, et l'analyse de leurs effets sur la gestion du phoma du colza et de la durabilité des résistances.**

La question principale de recherche se décline en quatre sous-questions, qui seront traitées dans les chapitres suivants (Figure 1.13) :

- (1) Comment construire des scénarios de systèmes de culture quantitatifs, dont les hypothèses sont décrites narrativement, à une échelle supraparcellaire, avec des acteurs locaux, pour contrôler le phoma du colza et améliorer la durabilité des résistances variétales ?
- (2) Quels sont, parmi les leviers techniques mobilisés dans les scénarios construits localement par les acteurs, les leviers les plus importants pour la gestion du phoma du colza et des résistances ?
- (3) Comment la spatialisation des pratiques joue sur l'impact de ces leviers pour la gestion du phoma et des résistances ?
- (4) Quelles échelles et règles spatiales (d'isolement) et/ou temporelles d'organisation des systèmes de culture, sont pertinentes pour une meilleure gestion du phoma et des résistances ?

Le manuscrit est structuré en cinq chapitres, les chapitres de résultats d'appuyant sur deux articles soumis (Chapitres 3 et 4) et un article en projet (Chapitre 5). Le deuxième chapitre présente les matériels et méthodes utilisés dans cette étude: le modèle d'évaluation des scénarios (SIPPOM-WOSR), les caractéristiques des terrains d'étude et les types d'analyses statistiques réalisées. Le troisième chapitre présente la méthode de construction des scénarios participatifs quantitatifs d'organisation des systèmes de culture proposée et son application dans les deux terrains d'étude. Le quatrième chapitre présente l'évaluation de ces scénarios sur la gestion du phoma du colza. Le cinquième chapitre étudie l'effet de l'échelle spatiale sur le contournement de la résistance, et explore l'effet de règles spatiales et temporelles sur la gestion du phoma du colza et des résistances. Finalement, le sixième chapitre présente une discussion générale sur la méthode utilisée pour la construction des scénarios et sur les résultats des chapitres 3, 4 et 5.

Chapitre 2. Matériels et Méthodes

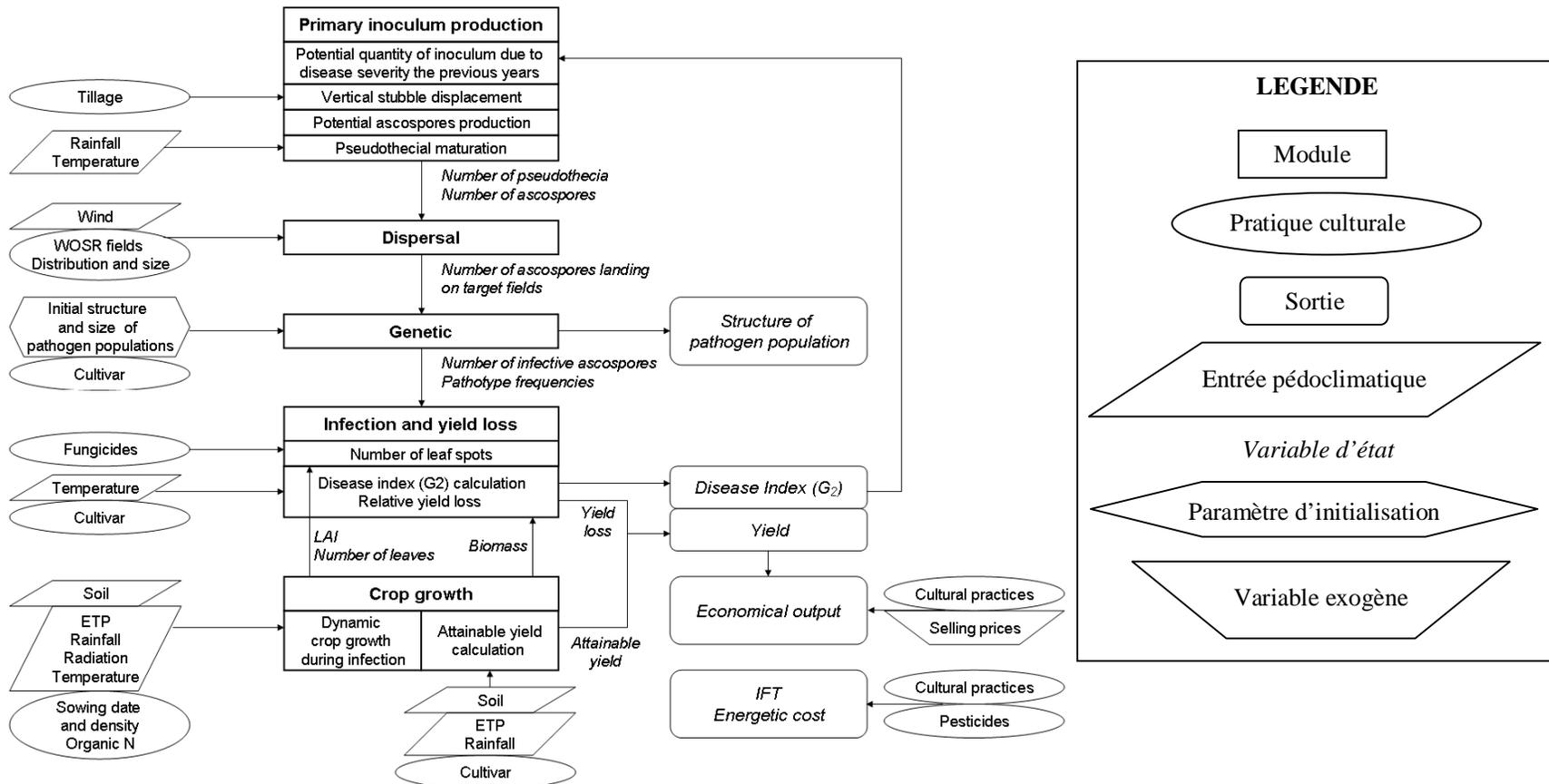


Figure 2.1 Diagramme de fonctionnement de SIPPOM-WOSR (source : Lô-Pelzer *et al.*, 2010b)

1. Le modèle SIPPOM-WOSR

Le modèle SIPPOM-WOSR (Simulator for Integrated Pathogen POPulation Management for Winter Oilseed Rape), développé par Lô-Pelzer *et al.* (2010a, 2010b), est un modèle spatialement explicite construit pour simuler l'effet du déploiement⁴³ des pratiques et des résistances sur l'évolution des populations pathogènes de phoma du colza. Il permet de tester des scénarios variés d'organisation spatiale des systèmes de culture pour identifier les plus favorables au maintien de l'efficacité des résistances spécifiques et au contrôle du phoma. Il prend ainsi en compte la localisation spatiale et temporelle du colza, des variétés de colza et des pratiques et simule leur impact sur l'évolution des populations de phoma du colza (en termes de taille de population et de fréquence des pathotypes) et donc sur la durabilité des résistances au phoma chez le colza. Le fonctionnement global du modèle SIPPOM-WOSR, qui est implémenté sous Mathematica 5.2 (Wolfram) et Borland C++ builder, est présenté dans la Figure 2.1.

1.1. Structure

Le modèle est structuré en cinq modules interconnectés, présentés ci-après : (1) production d'inoculum primaire, (2) dispersion des ascospores, (3) croissance du peuplement végétal, (4) génétique (évolution de la structure génétique des populations pathogènes) et (5) infection du colza et pertes de rendement associées (Figure 2.2).

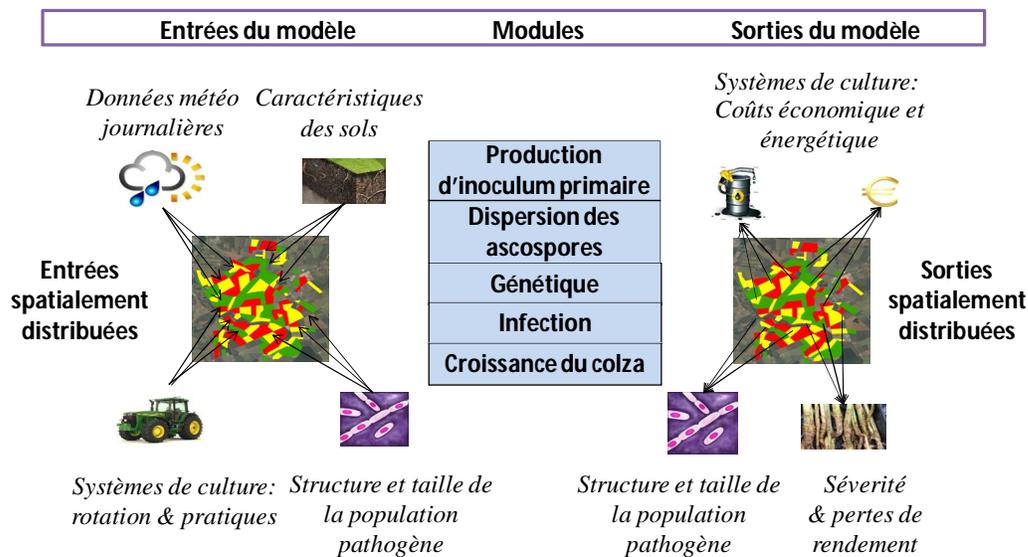


Figure 2.2. Structure, entrées et sorties du modèle SIPPOM-WOSR (adapté de Lô-Pelzer *et al.*, 2010a)

⁴³ Par déploiement nous entendons ici le déploiement spatial et temporel, i.e. la composition des systèmes de cultures (fréquence du colza, itinéraires techniques –y compris choix variétal) et leur localisation.

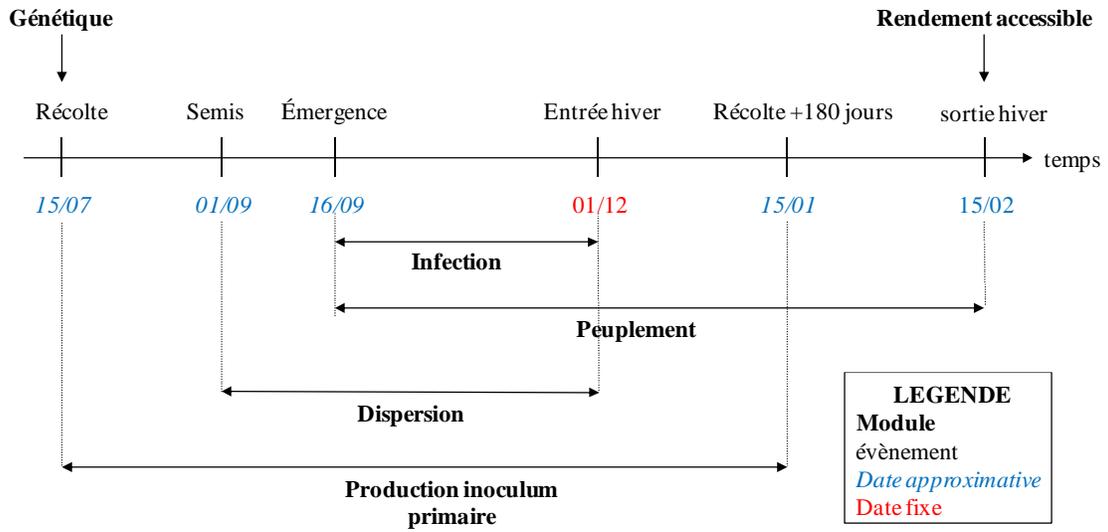


Figure 2.3. Fonctionnement du modèle SIPPOM pour une année de simulation (adapté de Lô-Pelzer *et al.*, 2010a).

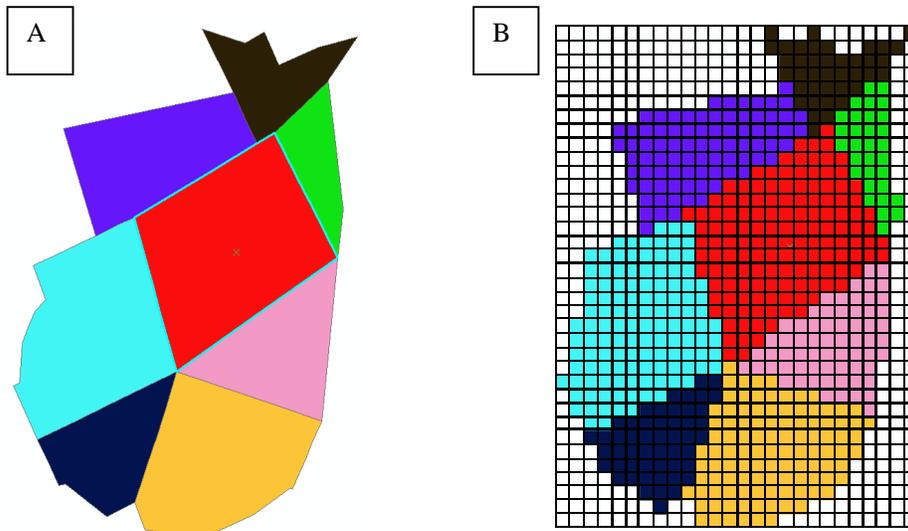


Figure 2.4. Exemple de découpage d'un petit paysage agricole composé de huit champs (noir, violet, vert, rouge, cyan, rose, bleu foncé et jaune).

Chaque pixel est représenté par un □. (A : Parcelles réelles ; B : Parcelles pixelisées).

Le pas de temps des est journalier, la période de l'année simulée différant entre les modules (Figure 2.3). Chaque module fonctionne à l'échelle du champ, à l'exception du module « dispersion des ascospores », à l'échelle de la région simulée (c.f. 1.1.2 ci-dessous). Une année de simulation correspond à une année culturale (du semis du colza au semis de la culture suivante). La représentation spatiale de la région utilisée est le raster, le paysage de simulation utilisé étant découpé en pixels de 50m x 50m.

1.1.1. Module de production de l'inoculum primaire

La production de l'inoculum primaire est simulée pour chaque champ ayant au sol des résidus infectés, source potentielle d'ascospores, i.e. chaque parcelle ayant été cultivée en colza l'année précédant l'année en cours de simulation. La production de l'inoculum primaire dépend de la sévérité de l'infection de phoma ayant eu lieu l'année précédente sur cette parcelle, i.e. la récurrence interannuelle de l'épidémie (Lô-Pelzer *et al.*, 2009). De la récolte des champs-sources d'ascospores à mi janvier environ (Figure 2.3), ce module simule :

- (1) le déplacement vertical et la décomposition des résidus dans le sol, en fonction des opérations culturales réalisées au champ (Schneider, 2005 ; Schneider *et al.*, 2006) ;
- (2) la dynamique de maturation des pseudothèces sur les résidus, basée sur le modèle SimMat (Aubertot *et al.*, 2006a) ;
- (3) le largage des ascospores par les pseudothèces (quantité et nombre d'ascospores disponibles pour la dispersion).

Ces différents processus dépendent des conditions climatiques (température et pluie).

1.1.2. Module de dispersion des ascospores

Chaque champ de la région agricole simulée est décrit par un ensemble de pixels (Figure 2.4). Au début de chaque saison culturale (i.e. de chaque année de simulation), les champs émetteurs potentiels d'ascospores (ceux cultivés en colza l'année culturale précédente : année n-1) et les champs récepteurs potentiels d'ascospores (ceux cultivés en colza l'année culturale en cours : année n) sont identifiés. La dispersion est réalisée chaque jour par couple de champs source/cible à partir de la date du premier semis de colza (dans le parcellaire agricole simulé) de l'année culturale actuelle (fin août-début septembre) jusqu'au 1^{er} décembre (Figure 2.3). La dispersion est réalisée à partir du centre des champs sources, à partir d'une fonction densité probabilité demi-Cauchy-Lorentz, dans une version déterministe adaptée du modèle de dispersion stochastique AnthracnoseTracer développé par Diggle *et al.* (2002).

La dispersion champ à champ dépend des conditions climatiques (direction et intensité journalières du vent).

1.1.3. Module de croissance du peuplement végétal

Ce module est basé sur le modèle Azodyn-rape (Jeuffroy *et al.*, 2003). La croissance du colza est simulée quotidiennement pour chaque champ du semis à la sortie de l'hiver (Figure 2.3). La croissance du colza dépend des dates et densités de semis, des caractéristiques pédologiques de la parcelle et des conditions climatiques (pluie, rayonnement global, température moyenne et évapotranspiration potentielle).

Ce module permet de simuler les stades du colza et la surface foliaire journalière, variables nécessaires pour déterminer la possibilité d'une infection en cas de réception de spores compatibles. Il permet également de calculer les biomasses en entrée et sortie d'hiver, nécessaires respectivement pour calculer la sévérité de l'infection et le rendement accessible.

Force évolutive	Mécanisme	Conséquence
Sélection	Processus qui entraîne une reproduction supérieure ou inférieure	Sélection des agents pathogènes les plus adaptés aux conditions locales
Migration	Flux de gènes ou de génotypes entre les populations d'un agent pathogène	Déplacement des allèles et des génotypes mutants virulents entre les populations
Recombinaison sexuée	Modification des associations d'allèles	Modification de la diversité génétique globale (multilocus)

Table 2.1. Forces évolutives impliquées dans l'adaptation des agents pathogènes incluses dans le modèle SIPPOM-WOSR (Sources: Burdon, 1993; Darwin et Wallace, 1858; Henry et Gouyon, 1999; McDonald et Linde, 2002; Thrall et Burdon, 2002)

$$DI = \alpha_{RQ} \frac{DI_{max} \cdot \exp(a_0 + a_1 \cdot N_{max} + a_2 \cdot TT + a_3 \cdot BMEH)}{1 + \exp(a_0 + a_1 \cdot N_{max} + a_2 \cdot TT + a_3 \cdot BMEH)}$$

Equation 2.1. Calcul de l'indice de sévérité (G2) pour chaque parcelle semée en colza durant l'année culturale simulée.

α_{RQ} correspond au niveau de résistance quantitative (compris entre 0 et 1), DI correspond à l'indice de sévérité de la maladie (note G2), DI_{max} à la note G2 maximale (9), TT à la somme de température entre l'émergence du colza et le 31/12, BMEH correspond à la biomasse de colza en entrée d'hiver (source : Lô-Pelzer *et al.*, 2010a)

$$Y_{loss} = a \cdot DI^2 + b \cdot DI$$

Equation 2.2. Calcul des pertes de rendement relatives associées au phoma. Y_{loss} correspond aux pertes de rendement relatives, DI à l'indice de sévérité de la maladie (G2) (source : Aubertot *et al.*, 2004b)

Deux méthodes sont disponibles pour le rendement accessible⁴⁴ : (1) il peut être calculé en fonction du rendement potentiel, de la biomasse sortie hiver, du déficit hydrique⁴⁵ et de la réserve utile maximum (Lô-Pelzer *et al.*, 2010a) ; (2) un rendement accessible local par variété et par type de sol peut être défini par l'utilisateur (Boillot, 2008).

1.1.4. Module génétique

Trois forces évolutives sont prises en compte dans SIPPOM-WOSR : la sélection, la migration et la recombinaison (Table 2.1). La sélection est ici liée au choix et à la distribution spatiale des variétés portant un (ou plusieurs) gènes de résistance. La migration est en lien avec l'aspect spatial du modèle. La recombinaison est prise en compte dans le cas où plus d'un gène d'avorulence est simulé.

A la fin de chaque saison de dispersion, les nouvelles fréquences de pathotypes sont calculées pour chaque pixel en fonction du nombre et du type de spores arrivées sur les plantes du pixel pendant la période infectieuse (i.e. en ne considérant que les ascospores contaminantes, en fonction de leur génétique et de celle de la variété cultivée).

1.1.5. Module infection du colza et pertes de rendement associées

Le module sur l'infection du colza est basé sur le modèle SimCanker développé par Aubertot *et al.* (2004b). La sévérité de l'infection (Equation 2.1) et les pertes de rendement associées au phoma (Equation 2.2) sont calculées en fonction de trois variables :

- (1) le nombre maximal de macules par plante pendant la saison infectieuse (de l'émergence du colza au 31 décembre de l'année culturale simulée) ;
- (2) la somme de température entre le 1^{er} octobre et le 31 décembre de l'année culturale simulée ;
- (3) la biomasse de colza en entrée d'hiver (au 1^{er} décembre de l'année culturale simulée).

Le nombre de macules dépend de la surface foliaire du colza disponible pour la réception des spores, du nombre de spores arrivant sur la plante et de l'efficacité d'un éventuel fongicide appliqué durant la période infectieuse.

La possibilité d'infection dépend de la compatibilité entre la variété de colza de la parcelle considérée et le type de spores arrivant sur la parcelle (i.e. si la plante possède le gène de résistance RlmX et que le pathogène possède le gène d'avorulence correspondant AvrlmX, il n'y aura pas infection ; Figure 1.1). Dans ce module est prise en compte la résistance quantitative, dont l'effet est caractérisé par une baisse de la note de sévérité (Equation 2.1). Deux niveaux ont été définis pour la résistance quantitative : si la résistance quantitative de la variété est définie comme intermédiaire ($\alpha_{RQ} = 1$), l'indice de maladie G2 correspond à 65% de cet indice calculé sans résistance quantitative ($\alpha_{RQ} = 0$) ; il correspond à 42% de la note G2 si la variété est caractérisée par un fort niveau de résistance quantitative ($\alpha_{RQ} = 2$).

1.2. Entrées du modèle

Pour réaliser une simulation avec SIPPOM-WOSR, un parcellaire agricole, support de simulation, est nécessaire (Figure 2.2). Les rotations associées à chacune des parcelles de ce paysage doivent être décrites, ainsi que l'itinéraire technique pour les cultures de colza : variété ; date et densité de semis ; application d'azote organique à l'automne (date, dose et produit) ; application de fongicide (date et produit) ; gestion des résidus (date(s) et type(s) d'outil(s) utilisé(s) ; date du semis de la culture suivant

⁴⁴ van Ittersum *et al.* (1997) définissent le rendement accessible comme le rendement potentiel contraint uniquement par une limitation en eau ou en nutriments.

⁴⁵ Le déficit hydrique (DH) est calculé de la fin de l'hiver à la récolte : $DH = \sum_j (ETP_j - P_j)$, avec ETP_j l'évapotranspiration journalière du système plante-sol et P_j la pluie journalière.

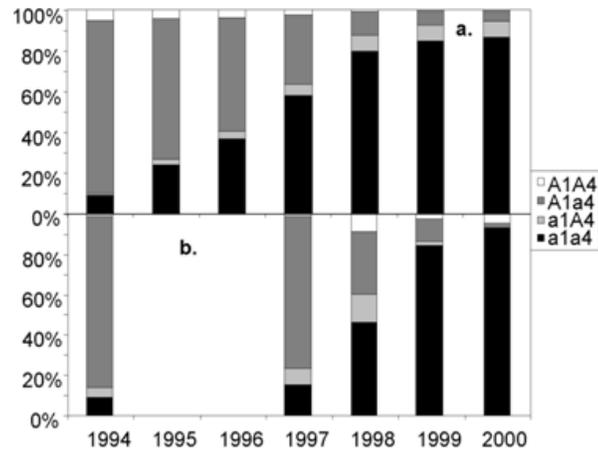


Figure 2.5. Evaluation des fréquences des pathotypes associées aux gènes de résistance Rlm1 et Rlm4 après insertion du gène Rlm1 ; (a) fréquences simulées ; (b) fréquences observées (issues de Rouxel *et al.*, 2003). Pour les pathotypes en légende, a et A signifient respectivement la virulence et l'avorulence. (Source: Lô-Pelzer *et al.*, 2010a)

le colza. A chaque variété de colza cultivée dans la zone considérée doit être associée la présence/absence de gènes de résistance majeure, un niveau de résistance quantitative et un rendement potentiel⁴⁶ (par type de sol).

Chacune des parcelles du parcellaire agricole support de simulation doit être décrit pédologiquement en termes de : texture (fraction d'argile, ‰), fraction d'azote organique (‰), épaisseur de la couche de minéralisation (dm), fraction de carbonate de calcium (‰), la réserve utile maximum (mm d'eau), la profondeur de sol (dm) et la densité apparente de la couche labourée (g.cm⁻³).

Les données météorologiques locales journalières nécessaires au fonctionnement de SIPPOM-WOSR sont : la pluie (mm), l'intensité (m.s⁻¹) et la direction (°) du vent, la température moyenne (°C), l'évapotranspiration potentielle (mm) et le rayonnement global (MJ.m⁻²). Ces données sont définies à l'échelle de la région simulée.

Le nombre de gènes de résistance à considérer ainsi que la taille, la structure de la population pathogène au début de la simulation (i.e. la fréquence de chaque pathotype, caractérisé par la combinaison des gènes d'avirulence) et la pression de maladie initiale (note G2 initiale) doivent être précisés. La localisation initiale de la population pathogène dépend de l'année d'initialisation (i.e. des parcelles cultivées en colza pendant l'année d'initialisation, qui seront potentiellement émettrices de spores pour la 1^{ère} année de simulation).

Le nombre d'années à simuler doit être précisé.

1.3. Sorties du modèle

Les sorties du modèle sont épidémiques (taille de la population pathogène, indice de sévérité G2 et pertes de rendement associées au phoma), génétiques (structure de la population pathogène) et agronomiques (rendement accessible et rendement final). Elles sont calculées annuellement, à la fin de chaque saison culturale, pour chaque parcelle cultivée en colza durant l'année culturale simulée, à l'échelle du champ (sorties production d'inoculum primaire, croissance du colza : biomasse et rendement accessible) ou du pixel (dispersion et infection). Ces données peuvent être synthétisées à l'échelle de la région en prenant en compte d'une part les sorties du modèle et d'autre part les surfaces des parcelles considérées, de manière à obtenir des sorties agrégées à l'échelle de la région simulée (voir Chapitre 4).

1.4. Améliorations réalisées et validation

L'évaluation du comportement du modèle SIPPOM-WOSR a été réalisée pour chaque module et à l'échelle globale, i.e. respectivement sur les sorties par module (variables intermédiaires) et sur les sorties globales (variables finales).

A l'échelle globale, cette évaluation a été réalisée en deux étapes :

- (1) la comparaison de données simulées et de données expérimentales de la région Centre a montré que le modèle simule de manière cohérente l'évolution des populations virulentes sur les gènes de résistance Rlm1 et Rlm4, avec cependant une vitesse de contournement de ces gènes plus rapide dans les simulations par rapport aux données réelles (Figure 2.5 ; Boillot, 2008 ; Lô-Pelzer *et al.*, 2010a) ;
- (2) la simulation de pratiques culturales contrastées du colza vis-à-vis de la gestion du phoma (tests sur les entrées du modèle) a montré un classement de ces systèmes cohérent avec l'avis de différents experts (agronomes, CETIOM⁴⁷) (Lô-Pelzer *et al.*, 2010a ; 2010b).

⁴⁶ Selon van Ittersum *et al.* (1997), le rendement potentiel est défini par les facteurs définissant la croissance : radiation, température et caractéristiques de la culture, en conditions non limitantes pour la nutrition hydrique et en nutriments et sans autres facteurs réduisant la croissance (par exemple une maladie).

Pour chaque module du modèle, une analyse de sensibilité aux paramètres a été réalisée, quantifiant la réponse des variables d'état (variables de sortie modulaires) à une variation des paramètres. Le classement de ces sorties a montré que (1) la réponse des modules aux variations de paramètres et d'entrées (pratiques culturales) est conforme aux dires d'experts, et (2) le classement des stratégies de contrôle du phoma testées est stable sous différentes conditions climatiques quand les paramètres varient (Lô-Pelzer *et al.*, 2010b).

Ces évaluations ont montré que le rendement accessible à dires d'experts (par type de sol et par type de variété) est plus réaliste que le mode de calcul basé sur des variables variétale (rendement potentiel), de disponibilité en eau (déficit hydrique, réserve utile maximum) et de croissance (biomasse). En effet, ce mode de calcul simule des rendements accessibles surévalués, en lien avec la surévaluation de la biomasse par le module « croissance du couvert de colza » (Boillot, 2008).

Bien que ces évaluations de SIPPOM-WOSR montrent un comportement global satisfaisant du modèle, permettant de classer de manière stable et cohérente les différentes stratégies de contrôle testées, plusieurs limites ont été identifiées :

- (i) Sur l'évaluation de la maladie : la note G2 (indice de maladie) est surestimée. Ceci peut être dû à la relation utilisée pour ce calcul (Equation 2.1), dont le domaine de validité en termes de gammes de température est restreint, et pour laquelle certaines variables *a priori* importantes ne sont pas prises en compte, comme par exemple l'humidité au moment de l'infection (Toscano-Underwood *et al.*, 2001) ou les conditions de température pendant la phase de croissance systémique du champignon dans la tige (Li *et al.*, 2006b), dont l'impact pourrait être lié aux variétés (Sun *et al.*, 2001) ;
- (ii) Sur le contournement de la résistance : par comparaison avec des données réelles, l'évolution des populations virulentes est plus rapide dans les simulations par rapport à la réalité. Cela pourrait être dû (1) à la non prise en compte des coûts de virulence liés à la perte des gènes d'virulence chez les agents pathogènes (ces coûts pourraient ralentir la sélection des individus virulents) ; (2) à la possible sensibilité de la relation gène pour gène aux conditions de milieu (Huang *et al.*, 2006) ; (3) aux informations frustes sur la résistance quantitative (2 niveaux actuellement utilisés), sans érosion de la résistance quantitative au fil du temps ; (4) aux possibles interactions entre plusieurs gènes d'virulence (résistances spécifiques) ; (5) à la surestimation des notes G2 ;
- (iii) Le temps de calcul est limitant (8 heures pour une simulation sur 5 ans avec un parcellaire de 3 km * 3 km (damier de 144 parcelles) (Lô-Pelzer, 2008).

1.4.1. Améliorations réalisées

Au vu des principales limites identifiées lors des précédentes études, j'ai réalisé deux modifications principales du modèle SIPPOM-WOSR : (1) un changement dans la représentation du spatial, dont l'objectif est de réduire les temps de calcul, condition nécessaire pour pouvoir simuler un grand nombre de scénarios ; (2) une modification des conditions nécessaires à l'infection, de manière à mieux estimer les notes G2.

⁴⁷ CETIOM : Centre Technique des Oléagineux

1.4.1.1. Représentation du spatial

De manière à réduire les temps de calculs, la représentation spatiale a été changée du mode raster au mode vectoriel, i.e. l'unité de base de calcul passe du pixel à la parcelle, y compris pour les flux de spores (Figure 2.6 ; Table 2.2). Les calculs de dispersion parcelle à parcelle ont été réalisés avec le logiciel CaliFloPP (Bouvier *et al.*, 2009). L'algorithme de ce logiciel permet de calculer des intégrales de fonction de dispersion point à point entre une parcelle source et une parcelle cible. La fonction de dispersion ici utilisée est identique à celle de la version initiale de SIPPOM-WOSR, i.e. en fonction de l'intensité et de la dispersion du vent.

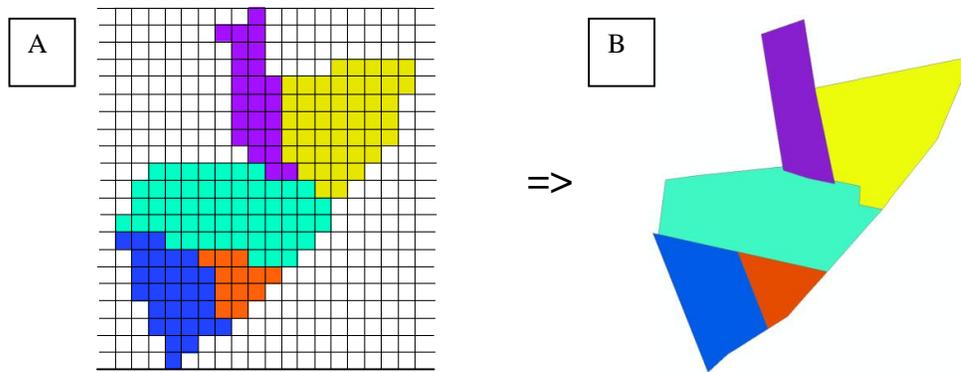


Figure 2.6. Changement de mode de représentation du spatial du raster (A) au vectoriel (B): l'unité de base de calcul passe du pixel à la parcelle

	Mode raster	Mode vecteur
Unité spatiale	pixel de 50*50m	parcelle
Localisation de l'inoculum primaire	au centre du pixel	sur toute la parcelle
Calcul de la distance source-cible	du centre du pixel au transect (orienté) de la parcelle source	de point source à point cible (transect orienté)

Table 2.2. Principales caractéristiques des modes raster et vectoriel

$$W_{(T)} = \frac{W_{min}}{f_{(T)}} \leq W_{max}$$

Equation 2.3. Modèle d'infection de Magarey *et al.* (2005) permettant de calculer la durée d'humidité nécessaire à l'infection, en fonction de la température.

$W_{(T)}$: durée d'humidité nécessaire à l'infection à la température T ; W_{min} : durée d'humidité minimum pour l'infection ; $f_{(T)}$: fonction de réponse à la température (c.f. Equation 2.4); W_{max} : limite supérieure de $W(T)$ permettant de rendre compte des situations où l'humidité n'est plus la condition limitante à l'infection

$$f_{(T)} = \left(\frac{T_{max}-T}{T_{max}-T_{opt}} \right) \left(\frac{T-T_{min}}{T_{opt}-T_{min}} \right)^{(T_{opt}-T_{min})/(T_{max}-T_{opt})} \quad \text{si } T_{min} \leq T \leq T_{max} ; 0 \text{ sinon}$$

Equation 2.4. Fonction de réponse à la température de Magarey *et al.* (2005) pour le calcul de la durée d'humidité nécessaire à l'infection.

T_{max} : température maximale pour l'infection ; T : température (°C) ; T_{opt} : température optimale pour l'infection ; T_{min} : température minimum pour l'infection

Paramètre	Valeur
Tmin : température minimum	2.6 °C
Topt : température optimale	18.5 °C
Tmax : température maximale pour l'infection	35 °C
Wmin : durée d'humidité minimum	7 h
Wmax : durée d'humidité maximale	18 h

Table 2.3. Valeurs des paramètres utilisés pour calculer la durée d'humectation nécessaire d'une spore de *Leptosphaeria maculans* sur une feuille de colza d'hiver (source : Magarey *et al.*, 2005)

Pathotype	aXaY	AXAY	AXaY	aXAY
Fréquence initiale	9,8.10-8	0,019999998	2.10-9	0,9799999902

Table 2.4. Fréquences initiales des différents pathotypes pour les simulations

1.4.1.2. Modification des conditions d'infection

De manière à mieux simuler l'infection et la sévérité de la maladie, nous avons choisi de modifier le modèle sur les conditions d'infection, i.e. au moment où les spores issues de la dispersion entrent en contact avec les feuilles de colza. Des conditions climatiques nécessaires à l'infection ont ainsi été introduites : la durée d'humidité et la température (Biddulph *et al.*, 1999). L'effet et la quantification de ces deux paramètres sont issus du modèle générique proposé par Magarey *et al.* (2005) pour l'infection foliaire due à des champignons pathogènes. Ce modèle permet de calculer la durée minimum d'humidité, thermo-dépendante, nécessaire à l'infection (Equation 2.3 ; Equation 2.4) avec une paramétrisation réalisée pour *Leptosphaeria maculans* (Table 2.3).

L'introduction de ces conditions climatiques nécessaires à l'infection va engendrer une diminution du nombre de macules simulées, et jouer ainsi sur l'indice de sévérité G2 (cf. Equation 2.1). Elle implique l'ajout de la durée journalière d'humidité comme nouvelle entrée climatique du modèle SIPPOM-WOSR.

1.4.2. Validation des améliorations

1.4.2.1. Méthode

Pour chaque modification du modèle SIPPOM-WOSR, une simulation de cinq ans (une année d'initialisation et quatre années de simulation *per se*) a été réalisée, avec et sans cette modification, sur le parcellaire d'une petite région agricole de la région Centre (121 parcelles, 16 km², voir Chapitre 2.2.2) situé sur la commune de Civray. Les systèmes de culture et leur localisation utilisés pour ces simulations sont issus d'enquêtes réalisées sur la commune de Civray (cf. Annexe B et Chapitre 3). Les données climatiques utilisées sont locales (Annexe C). Deux gènes d'avorulence sont considérés (AX et AY). Leurs fréquences initiales en début de simulation sont respectivement de 0.98 pour avrlmX et 10⁻⁷ pour avrlmY, i.e. le gène RlmX est contourné par la population pathogène et le gène RlmY vient d'être introduit dans le parcellaire agricole (Table 2.4). Ce sont les fréquences utilisées par Boillot (2008) pour une configuration de SIPPOM-WOSR pour les gènes de résistance Rlm1 et Rlm4.

Les sorties comparées avant et après modification du modèle sont :

- à l'échelle de la parcelle : les notes G2 (dont sont directement dérivées les pertes de rendement, cf. Equation 2.2).
- à l'échelle de la région simulée : la taille de la population pathogène et la structure de la population virulente (respectivement pondérée et sommée par les tailles de parcelles).

Pour chacune des deux modifications réalisées, une comparaison avec des données au champ disponibles sur la zone simulée a également été réalisée (21 notes G2 sur la zone, issues d'enquêtes auprès d'agriculteurs).

Année de simulation	Ratio spores
2004-2005	1.013
2005-2006	1.021
2006-2007	0.992
2007-2008	1.027

Table 2.5. Comparaison du nombre de spores émises entre les modes raster et vecteur

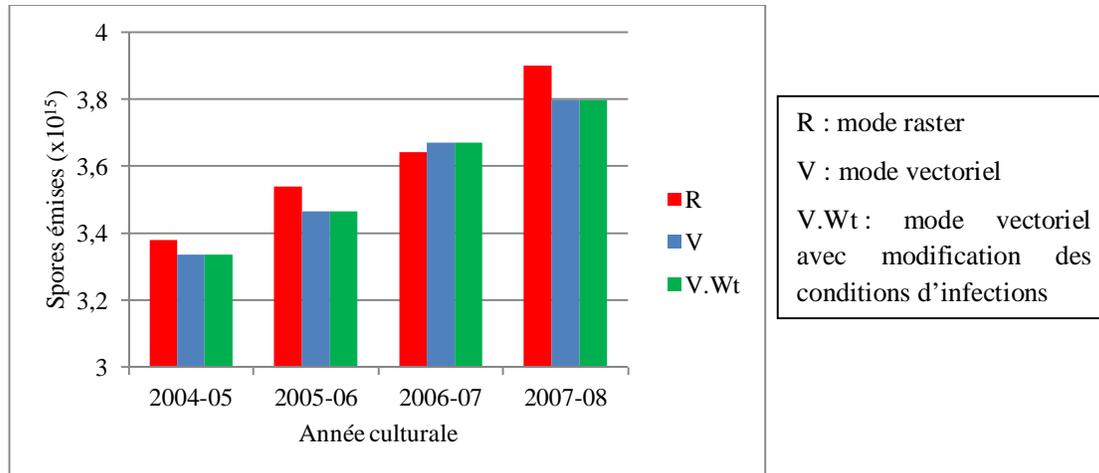


Figure 2.7. Comparaison du nombre de spores émises selon les modifications de SIPPOM-WOSR réalisées.

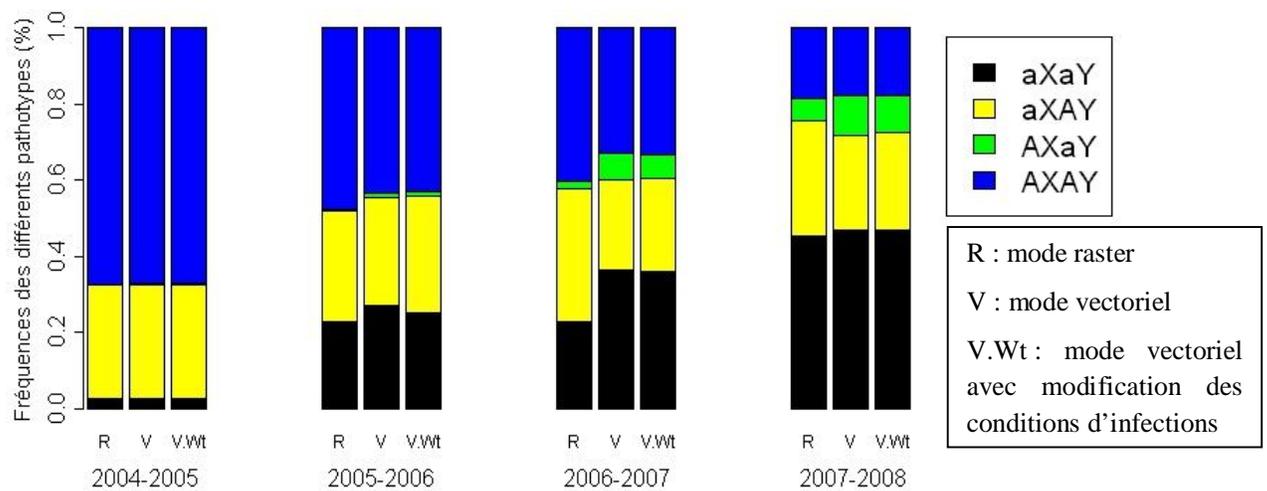


Figure 2.8. Comparaison des structures de la population pathogène selon les modifications de SIPPOM-WOSR réalisées.

a : pathotype virulent sur le gène considéré ; A : pathotype avirulent sur ce gène (i.e. incapable d'infecter les variétés porteuses de ce gène)

1.4.2.2. Validation du changement de représentation du spatial

Le changement du mode raster au mode vecteur ne change pas de manière notable le nombre de spores émises par saison culturale à l'échelle de la région, le ratio entre les deux modes étant proche de 1 pour les quatre années de simulation (Table 2.5 ; Figure 2.7).

Les notes G_2 calculées à partir des simulations avec le mode vecteur sont plus faibles que celles calculées avec le mode raster (Figure 2.9 ; Figure 2.10). Le calcul de la note G_2 dans SIPPOM dépend de quatre variables : le nombre maximum de macules, la biomasse fraîche de colza en entrée d'hiver, la somme de températures du dernier trimestre (octobre-décembre) et la résistance quantitative. Les différences de notes G_2 sont dues aux différences de nombre de macules maximal simulé, plus faibles avec le mode vecteur.

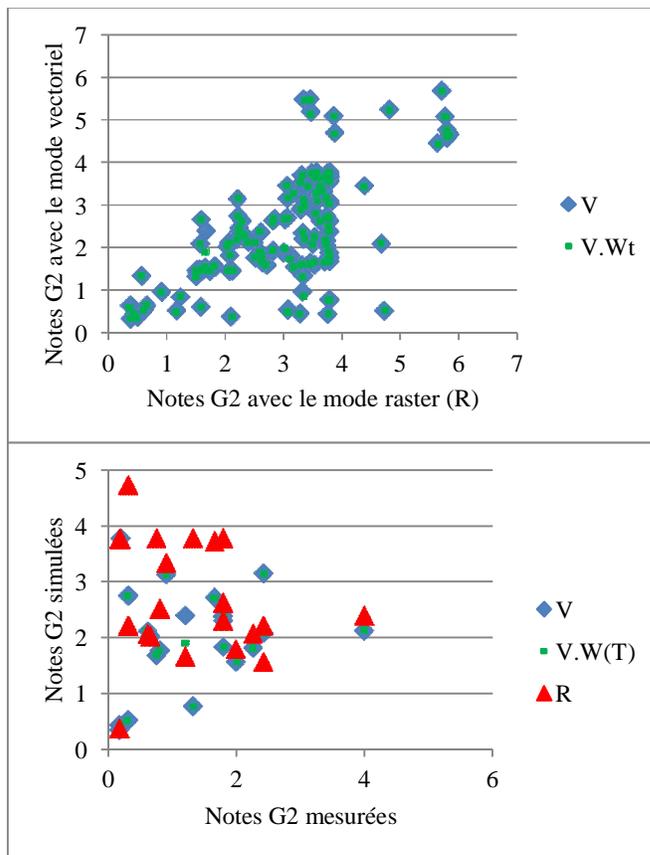


Figure 2.9. Comparaison des notes G_2 , pour l'ensemble des parcelles, avec et sans modification de la représentation du spatial et ajout des conditions de durée d'humectation nécessaire à l'infection.

R : mode raster
 V : mode vectoriel
 V.Wt : mode vectoriel avec modification des conditions d'infections

Figure 2.10. Comparaison des notes G_2 , pour les parcelles avec données mesurées, avec et sans modification de la représentation du spatial et ajout des conditions de durée d'humectation nécessaire à l'infection.

Concernant la structure de la population pathogène, le changement de représentation du spatial ne modifie pas globalement la dynamique d'évolution des pathotypes virulents sur les gènes de résistance RlmX et RlmY. Pour les années culturales 2006-2007 et 2007-2008, le pathotype virulent sur RlmX et avirulent sur RlmY (i.e. pathotypes aXAY) est plus fréquent avec le mode raster qu'avec le mode vectoriel, au détriment du pathotype avirulent sur RlmX et virulent sur RlmY (pathotype AXaY). Si l'on s'intéresse aux pathotypes virulents sur les variétés porteuses du gène de résistance RlmY (pathotypes AXaY et aXaY), le mode vectoriel tend à simuler un contournement plus rapide (Figure 2.8).

Les différences constatées entre les deux modes de représentation du spatial peuvent s'expliquer par (1) la taille et la forme des parcelles prises en compte dans les deux modes (i.e. simplification du paysage par leur découpage en pixels dans le mode raster (Figure 2.6)) ; (2) le mode de calcul

(moyenne parcellaire par pixel en mode raster vs. une donnée par parcelle pour le mode vecteur) ; (3) le calcul de la dispersion en lui-même : en effet, les distances de dispersion sont par définition différentes selon les deux modes (Table 2.2).

Par ailleurs, la modification de représentation du spatial dans le modèle SIPPOM-WOSR a permis de réduire le temps de calcul de 8 heures à 15 minutes environ. Le temps de calcul reste cependant dépendant (1) de la durée de simulation ; (2) du parcellaire support de la simulation (i.e. nombre de parcelles) ; (3) de la fréquence du colza dans les systèmes de culture simulés.

1.4.2.3. Validation des modifications des conditions d'infection

L'ajout des conditions d'humidité journalière thermo-dépendantes nécessaires à l'infection ne modifie pas les sorties épidémiologiques et génétiques de SIPPOM-WOSR (Figure 2.8 ; Figure 2.7 ; Figure 2.9 ; Figure 2.10). Bien que cette modification diminue le nombre de jours pour lesquels la réception d'une spore engendrera une infection (i.e. une macule), les notes G2 (qui dépendent du nombre de macules maximum) ne sont pas modifiées (Figure 2.9 ; Figure 2.10). Les conditions d'humidité (dépendantes de la température) ne semblent donc pas limitantes pour l'infection foliaire pour les données climatiques utilisées pour ces simulations.

Conclusion partielle

Les modifications de la représentation du spatial et des conditions d'infection changent très faiblement les sorties épidémiologiques et agronomiques de SIPPOM-WOSR, sur des simulations basées sur les systèmes de culture de la région Centre de 2003 à 2008.

La modification de représentation du spatial permet de diminuer drastiquement les temps de calcul. L'ajout de conditions nécessaires à l'infection joue très faiblement sur les sorties, tout en étant épidémiologiquement cohérente.

Ces deux modifications ont donc été conservées dans le modèle SIPPOM-WOSR pour toutes les simulations réalisées dans la suite de ce manuscrit.

2. Présentation des deux terrains d'étude

2.1. Critères de choix des régions d'étude

Compte tenu de la variabilité des pratiques agricoles rencontrées au sein des territoires et de la multiplicité des leviers d'action potentiels, deux terrains d'étude, localisés dans deux régions différentes, ont été choisis dans le cadre de cette thèse. Ces territoires d'étude ont été choisis pour leur diversité concernant plusieurs critères (Table 2.6):

- les caractéristiques du parcellaire (taille des parcelles),
- les systèmes de cultures et les techniques culturales appliquées au colza, influençant la maladie : rotation (qui va déterminer la fréquence du colza dans le territoire et impacter les distances moyennes entre parcelles de colza), gestion des résidus, gestion de l'azote automnal, densité et date de semis, variétés et fongicides ;
- l'historique par rapport à l'occurrence d'années marquées par des épidémies de phoma du colza ;
- les types d'acteurs ayant une influence sur les pratiques et leur organisation locale (CETIOM, agriculteurs, organismes de collecte-stockage (OS), sélectionneurs, conseillers de Chambre d'Agriculture (CA), etc.).

L'évaluation de ces critères a été réalisée à partir d'avis d'experts techniques (e.g. CETIOM) et/ou scientifiques (INRA UMR Agronomie pour les caractéristiques agronomiques et UMR SADAPT pour l'organisation régionale par les acteurs), ainsi qu'à partir d'informations spatiales (RPG) et statistiques (données SCEES - Enquêtes Pratiques Culturelles 2006).

Les deux terrains d'étude sur lesquels a été appliquée la démarche participative de construction des scénarios sont le Centre et la Picardie.

Type de critère	Critères
Caractéristiques parcellaires	Taille des parcelles
Systèmes de culture	Fréquence colza dans territoire
	Distance moyenne entre parcelles
Itinéraire technique (pratiques ayant un impact sur la gestion du phoma)	Techniques travail sol, gestion de l'azote à l'automne, date/densité semis, variétés, fongicides
Historique sur le phoma du colza	Fréquence et impact des épidémies
Type d'acteurs	CETIOM, agriculteurs, OS, sélectionneurs, CA, agence de l'eau...
	Qui et pourquoi? Quels impacts sur les pratiques?

Table 2.6. Critères de choix des deux terrains d'étude pour l'application de la méthode participative de construction des scénarios

Contexte épidémiologique

La région Centre a connu de graves épidémies de phoma jusqu'à la fin des années 1990. La région Picardie n'a connu qu'une épidémie de phoma en 1992, qui a engendré de graves pertes de rendement (source : Noriap). L'augmentation récente des surfaces en colza dans cette région la rend plus vulnérable par rapport à cette problématique.

Type de critère	Critère	Centre	Picardie	source
Caractéristiques paysage	Taille moyenne d'une parcelle de colza	12.82 ha	10.67 ha	Données SCEES Enquêtes Pratiques Culturelles 2006
Rotation	Surfaces en colza (en % des terres arables)	15.7%	9.6%	Agreste 2011 (données 2010)
Techniques culturales ⁴⁸	Utilisation de variétés porteuses de Rlm ⁷⁴⁹ (%)	9%	2%	Données SCEES Enquêtes Pratiques Culturelles 2006
	Densité moyenne de semis	26.3 gr.m ⁻²	23.3 gr.m ⁻²	
	Surfaces en colza avec apport d'azote organique (en % des surfaces en colza)	11.4%	33.4%	
	Surfaces en colza labourées après récolte (en % des surfaces en colza ; 2004-2008)	36.8%	20.8%	
acteurs	Organisation des organismes de collecte-stockage (OS)	Un OS principal	OS très éclatés: 2 OS importants et de nombreux petits	Enquêtes CETIOM national, locaux, CA et OS
historique du phoma	"fréquence épidémies"	élevée	faible	Enquêtes CETIOM locaux

Table 2.7. Principaux critères de choix des régions d'étude

⁴⁸ Voir Détails en Annexe C.

⁴⁹ Pris comme exemple de gène introduit récemment dans le paysage agricole et non contourné à l'heure actuelle.

2.2. Présentation des deux régions d'étude

Les deux régions présentent une variabilité en fonction des principaux critères de choix définis (Table 2.7). En particulier, la fréquence du colza dans le territoire, la configuration variétale et l'utilisation plus ou moins courante du labour pour la gestion des résidus de colza préfigurent des sensibilités au phoma du colza très différentes. L'organisation des acteurs et leurs enjeux propres par rapport à la culture du colza participent également à différencier ces deux terrains. Les organismes de collecte et de stockage (OS) sont les pourvoyeurs de variétés et influencent les types de culture. Ils participent ainsi à la structuration du territoire : par la disponibilité des différents produits qu'ils proposent, ils vont plus ou moins contraindre les choix des agriculteurs. Par ailleurs, la culture du colza, récente en région Picardie et « traditionnelle » dans les systèmes de culture de la région Centre, est un enjeu fort dans les deux régions, du fait respectivement de son essor en Picardie et de son importance pour la rotation en région Centre. Cet historique de la culture du colza amène par ailleurs une technicité plus élevée en région Centre, avec des pratiques visant d'ores et déjà à la maîtrise du phoma (à l'échelle parcellaire), du fait de l'historique local de la maladie. Ces deux terrains présentent également des caractéristiques pédologiques et climatiques différentes, la Picardie présentant un climat plus frais et plus humide et des terres plus profondes que la région Centre (cf. Annexes A et C). Les caractéristiques détaillées de ces régions sont présentées dans les Chapitres 3 et 4, les parcellaires utilisés pour réaliser les simulations du modèle SIPPOM-WOSR sont présentés dans la Figure 2.11.

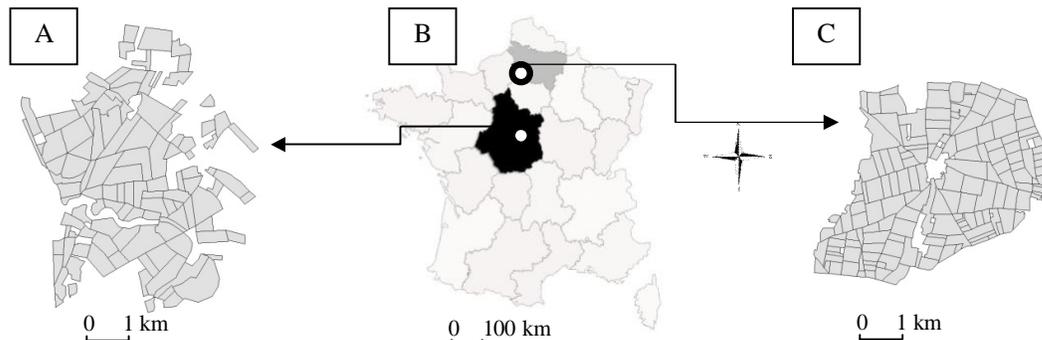


Figure 2.11. Parcélaires-supports de simulation pour les deux régions d'étude

B : région Picardie en gris et région Centre en noir ; A : parcellaire de la région Centre ; C : parcellaire de la région Picardie

3. Dispositif de recherche

3.1. Composition des groupes d'acteurs pour l'application de la démarche participative

Dans chacune des régions, l'ensemble des acteurs susceptibles d'avoir un impact ou d'être concerné par les pratiques agricoles et leur organisation au sein du territoire a été convié (voir liste détaillée pour chacune des régions dans le Chapitre 3) : (i) les sélectionneurs, créateurs des résistances et des variétés, (ii) les chercheurs, qui fournissent des connaissances sur les processus (cycle de la maladie et pratiques *a priori* favorables à sa gestion), (iii) les structures de développement, porteurs de conseils sur la gestion de la culture du colza, (iv) les coopératives et les négoce, qui à la fois conseillent les choix variétaux, la conduite du colza et peuvent réduire la gamme de choix des agriculteurs pour les variétés, (v) le CETIOM, qui produit des références locales sur les itinéraires techniques ; (vi) les structures administratives/législatives, qui peuvent, à travers les lois/directives, contraindre les pratiques agricoles ; (vii) les agriculteurs, décideurs finaux des systèmes de culture et itinéraires techniques.

D'autres acteurs potentiellement intéressés par l'organisation du paysage (ex. associations écologistes) ont également été conviés mais n'ont pas souhaité participer à cette étude.

3.2. Caractérisation des pratiques agricoles et échelle d'étude

Les pratiques agricoles considérées dans cette étude sont celles ayant un impact sur la gestion du phoma du colza et prises en compte par le modèle SIPPOM-WOSR (Lô-Pelzer *et al.*, 2010a). Elles sont définies à l'échelle du territoire, comme par exemple une fréquence de labour dans le territoire. Les systèmes de culture sont définis par une rotation, qui va déterminer la fréquence annuelle du colza dans le territoire, et les itinéraires techniques appliqués au colza et à la gestion de ses résidus (faisant donc partie de l'itinéraire technique de la culture suivante). Plusieurs systèmes de culture peuvent coexister au sein d'un même scénario (i.e. d'une même simulation) et sont traités de manière indépendante, i.e. les liens entre pratiques au sein d'un système de culture peuvent être explicités et pris en compte. Ces systèmes de cultures peuvent être distribués de manière aléatoire (Chapitres 3, 4 et 1^{ère} partie du Chapitre 5) ou selon des règles de décision spatiales (2^{ème} partie du Chapitre 5) aux parcelles du paysage support de la simulation.

3.3. Analyses statistiques

Les sorties du modèle SIPPOM-WOSR analysées sont épidémiologiques (structure et taille de la population pathogène) et agronomiques (pertes de rendement). Ces sorties sont analysées par comparaison entre les différentes simulations. Elles sont agrégées à l'échelle de la région. Pour réaliser cette agrégation, la taille de la population est sommée à l'échelle de la région, les pertes de rendement et fréquences d'individus étant moyennés (les surfaces des parcelles sont prises en compte dans les calculs ; voir formules dans le Chapitre 4). Pour identifier l'effet des pratiques culturelles mobilisées dans les simulations sur les trois sorties analysées, des régressions linéaires sont réalisées (Chapitre 4 et 1^{ère} partie du Chapitre 5). Ces analyses sont réalisées avec le logiciel R (R Development Core Team, 2005) par groupe de simulations.

Les analyses sont réalisées indépendamment dans les deux régions, du fait de la différence en termes de support de simulation (le parcellaire) de contexte pédoclimatique et agronomique (Chapitres 3 et 4 ; Annexes A à C).

Chapitre 3. Conception et application d'une méthode générique de construction participative de scénarios de systèmes de culture incluant du colza. Application au contrôle du phoma du colza et à la gestion des résistances dans deux terrains d'étude

Comme indiqué dans la problématique, une méthode a été mise au point pour concevoir des scénarios de systèmes de culture spatialisés pour leur évaluation sur la problématique du contrôle du phoma du colza et de la gestion des résistances. Cette méthode a été testée dans deux régions : la région Centre et la région Picardie, présentées dans la partie Matériel et Méthodes.

La première partie de ce chapitre présente la méthode et illustre son application en région Centre. Cette partie fait l'objet d'un article soumis à « Environmental Modelling and Software » en mai 2012. La deuxième partie de ce chapitre présente les résultats de l'application de la démarche participative de construction de scénarios en région Picardie.

Encadré 3.1. Matériel et méthodes utilisés pour la présentation et l'application de la méthode de construction de scénarios

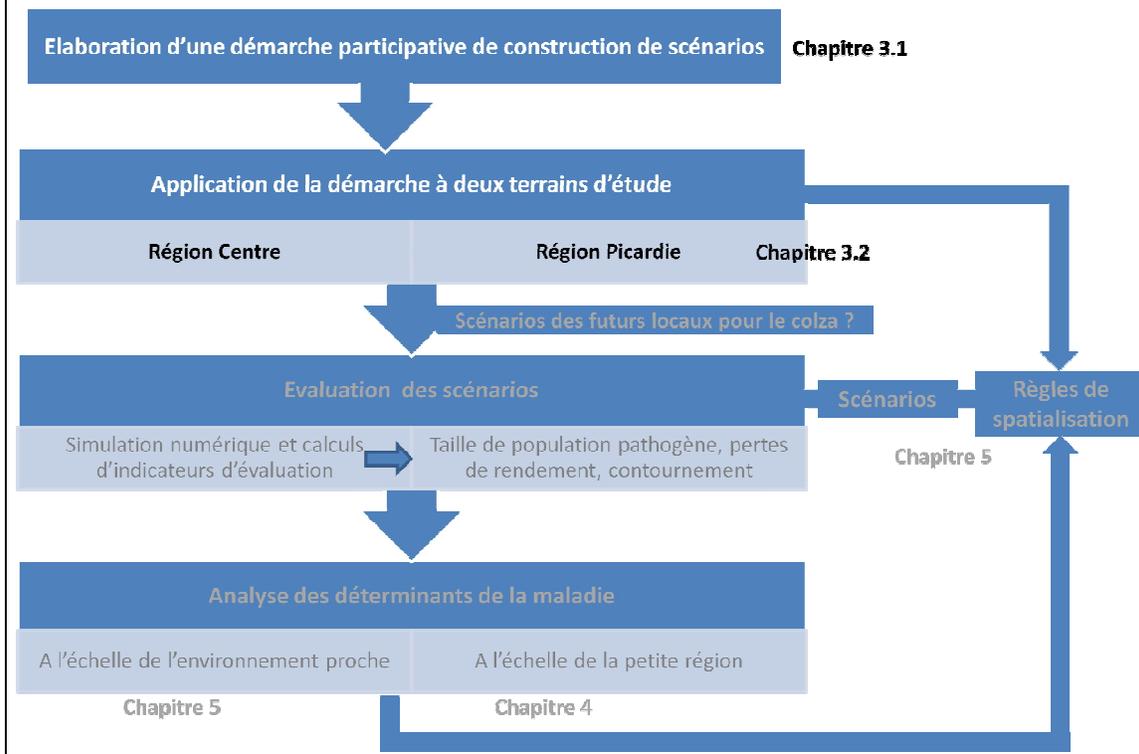
Question de recherche : Comment construire des scénarios de systèmes de culture narratifs et quantitatifs, à une échelle supra-parcellaire, avec des acteurs locaux, pour contrôler le phoma du colza et améliorer la durabilité des résistances variétales ?

Objectif : Mettre au point et tester une méthode de construction participative de scénarios quantitatifs, sous hypothèses narratives, définis à une échelle supra-parcellaire

Terrains d'étude : Centre (1^{ère} partie du chapitre) et Picardie (2^{ème} partie du chapitre)

Echelles temporelle et spatiale : Simulations de 5 ans (dont une année d'initialisation) sur les parcelles agricoles - supports de simulation

Variable(s) de caractérisation du phoma : Taille de la population pathogène, fréquence d'individus virulents sur la variété RlmX, pertes de rendement relatives



1. Présentation de la méthode participative de construction des scénarios et application au contrôle du phoma du colza et à la gestion des résistances en région Centre

A participatory approach to design spatial scenarios of cropping systems and assess their effects on phoma stem canker management at a regional scale

L. Hossard^{1,2,3,4,*}, M.H. Jeuffroy^{1,2}, E. Pelzer^{1,2}, X. Pinochet⁵, V. Souchere^{3,4}

¹ INRA, UMR211 Agronomie, F-78850 Thiverval-Grignon, France

² AgroParisTech, UMR211 Agronomie, F-78850 Thiverval-Grignon, France

³ INRA, UMR1048 SADAPT, F-78850 Thiverval-Grignon, France

⁴ AgroParisTech, UMR1048 SADAPT, F-78850 Thiverval-Grignon, France

⁵ CETIOM, BP-04, F-78850 Thiverval-Grignon, France

* Corresponding author Tel: +33 1 30 81 59 06; Fax: +33 1 30 81 54 25; E-mail address: Laure.Hossard@grignon.inra.fr

1.1. Résumé/Abstract

Résumé

Le phoma du colza est une maladie présente à l'échelle mondiale et responsable de pertes économiques majeures. Les principales méthodes de contrôle sont l'utilisation de variétés résistantes, les pratiques agricoles et l'organisation spatiale du territoire, impliquant des processus à de larges échelles spatiales. Une approche participative peut être utile pour traiter ce problème, qui requiert la coordination des acteurs sur le choix, la temporalité et la distribution spatiale des pratiques agricoles. Le concept de scénario est utilisé pour planifier les futurs systèmes de culture possibles et pour révéler leurs principaux leviers. Dans cet article, nous proposons une méthode pour (1) construire des scénarios quantitatifs d'utilisation des terres et (2) tester ces scénarios avec un modèle spatialement explicite préexistant de manière à évaluer les effets des différents scénarios sur la gestion du phoma du colza. Cette méthode se compose de six étapes, depuis l'identification des acteurs pertinents, la construction avec ces acteurs d'une vision globale du fonctionnement de la maladie et de l'ensemble des acteurs agissant sur la maladie, la construction collective des scénarios et enfin la discussion avec les acteurs des évaluations numériques des scénarios, basées sur leur simulation avec le modèle. Nous avons testé cette méthode sur un cas d'étude français. Ceci a révélé les bénéfices de la méthode concernant la diversité des scénarios construits collectivement (scénarios prédictifs et exploratoires, motivés par des changements de contexte locaux ou globaux), la diversité des résultats sur la gestion du phoma du colza et le processus d'apprentissage réciproque qui s'est effectué à partir des interactions entre les chercheurs et les acteurs locaux. Les forces et les faiblesses de la méthode sont discutées. Cette méthode, combinant une approche participative, la construction de scénarios narratifs et quantitatifs et leur évaluation avec un modèle préexistant, a souligné les bénéfices potentiels d'impliquer des acteurs pour gérer un problème local, ici le phoma du colza. Finalement, des recommandations sont émises pour améliorer l'acceptation d'un modèle dans une démarche participative.

Mots-clés : Approche scénario, conception participative, modèle de simulation spatialement explicite, phoma, colza

Abstract

Phoma stem canker is a worldwide disease of oilseed rape, responsible for major economic losses. The main control methods are the use of resistant cultivars, cropping practices and spatial territory organization, involving large-scale spatial processes. A participatory approach can be useful for dealing with this problem, which requires stakeholders' coordination as regards to the timing and spatial layout of cropping practices. The scenario concept is used to plan possible future cropping systems and to reveal their main drivers. In this paper, we propose a method to build quantitative land use scenarios and to test them with an existing spatially-explicit model to assess the effects of various scenarios on phoma stem canker management. The method is composed of six steps, from identifying stakeholders, building with them a common vision of the disease behaviour and acting stakeholders, collectively designing scenarios and discussing model-based scenario evaluations with stakeholders. We tested this method on a regional case in France. This revealed benefits of the method with respect to the diversity of designed scenario (predictive and exploratory scenarios; driven by local or global context change), the diversity of results on phoma stem canker management and the two-way learning process that occurred through interactions between researchers and field practitioners. Its strengths and weaknesses are discussed. This method, combining a participatory approach, qualitative and quantitative construction of scenarios and their evaluation with an existing model, highlighted the potential benefits of involving stakeholders in attempting to solve a local problem, in this case phoma stem canker management. Finally, recommendations are made to improve model acceptance.

Keywords: scenario approach, participatory design, spatial simulation model, phoma stem canker, winter oilseed rape

1.2. Introduction

Phoma stem canker (caused by *Leptosphaeria maculans*) is a worldwide disease of oilseed rape, responsible for major yield and economic losses (Fitt *et al.*, 2006). In a context of an increasing oilseed rape area and production in Europe (Eurostat, 2011), controlling this disease is of prime importance, through (i) a reduction in the pathogen population size and (ii) a limitation of the selection pressure on pathogen populations (Avirulence Management concept, Aubertot *et al.*, 2006b). The main field control method is the use of resistant cultivars: partial (quantitative) resistance, reducing the effect of the disease (Delourme *et al.*, 2006) or specific resistance halting the disease if the pathogen and plant harbour a common resistance gene (Flor, 1971). Yet specific resistance can be quickly overcome if the pathogen population adapt when cultivars with this resistance are grown on large areas (Rouxel *et al.*, 2003), leading to risks of large epidemics and subsequent economic losses because of the breakdown of the resistance. Other control methods include cropping practices, e.g. sowing date, fertilization (Aubertot *et al.*, 2004a) and tillage practices after winter oilseed rape harvest (Schneider *et al.*, 2006). However, studying phoma stem canker requires scaling up in both time and space. Firstly, considering the landscape scale is necessary to control this disease, as the responsible pathogens are wind-dispersed up to several kilometres (5-8 km; Bokor *et al.*, 1975). Secondly, management strategies have to be planned for the medium term because of the epidemic cycle of the disease, i.e. the disease in a given year affects its severity in the next year, as primary inoculum develops on oilseed rape-infected residues (Hall, 1992). According to Sprague *et al.* (2006), these “integrated strategies” have to consider cropping practices, cultivar resistance and deployment. While scaling up, control methods may thus involve distributions of cropping practices over time and space (Lô-Pelzer *et al.*, 2010a), including genotype deployment (Delourme *et al.*, 2006), but also the proportion of oilseed rape within the landscape (Fitt *et al.*, 2006). Thus cropping systems enabling sustainable disease control through an increase in the duration of cultivar resistance efficacy have to be managed on a

regional scale to minimize disease incidence, helping to stabilize yields and keep oilseed rape economically competitive. With this aim, a spatially explicit numerical model (SIPPOM-WOSR; Lô-Pelzer *et al.*, 2010a) has been developed to support the design and assessment of scenarios of regional cropping system management allowing efficient control of the disease and resistance sustainability. This semi-mechanistic model represents dynamics of pathogen population evolution (size and structure) and consequent effects on yield resulting from spatially-distributed cropping practices. It highlighted stable ranking of a wide range of integrated oilseed rape management strategies, ranking being consistent with experts' opinions (Lô-Pelzer *et al.*, 2010b). Models are widely acknowledged as "invaluable tools for resource management" (Caminiti, 2004). This tool can be used to explore the impacts of spatial cropping system management on phoma stem canker evolution.

To study potential impacts of spatially distributed cropping systems, land use scenarios can be very useful. Van Notten *et al.* (2005) describe scenarios as "descriptions of possible futures that reflect different perspectives on past, present and future developments", consisting of an initial situation and a description of driving forces inducing a specific future (Alcamo & Henrichs, 2008, pp. 13-35). Scenarios require identification and consideration of the main drivers of future changes (Dockerty *et al.*, 2006). The causes of change can be physical/ecological (e.g. climate change), social and/or economic (e.g. political, urban). Context changes will explore different assumptions for the future, which can be dealt by scenario analysis for their evaluations (Refsgaard *et al.*, 2007; Mahmoud *et al.*, 2009). Designing, analysing and assessing future scenarios for phoma stem canker management require consideration of the regional context, together with the spatial extent of the disease and the stakeholders' activities affecting and/or affected by the disease, whose management by using mainly cultivar genetics is perceived by some stakeholders as risky on the short and medium-term.

For issues involving large-scale spatial processes, designing land use scenarios can benefit from a participatory approach: different studies have shown the value of involving stakeholders concerned with the coordination of actions to promote scenarios that are effective in regard to the issue (e.g. on erosive runoff risks, Souchere *et al.*, 2009). Indeed, local stakeholders take or influence decisions for agricultural production and landscape changes (Primdahl, 1999), so it is appropriate for them to propose ways of solving the problems involved (Voinov & Gaddis, 2008) especially with regard to their potential scope. Moreover, involving stakeholders in decision processes related to resource management can lead to decisions that are better suited to local socio-cultural and environmental contexts and hence to good, sustainable decisions (Reed, 2008). If conflicting strategies are favoured by the stakeholders, a participatory process can help to define sustainable, feasible management options (Anderson *et al.*, 1998), as they understand their cost-effectiveness (Voinov & Bousquet, 2010). Cropping system scenarios aimed at controlling a disease without jeopardizing yields or profits are therefore likely to be better when designed together with stakeholders. Their participation in the process can increase their acceptance of the decisions made (Patel *et al.*, 2007) and their implementation (Luz, 2000). Moreover, participatory studies also allow participants to increase and share their experiences, knowledge and opinions, and can thus "actively engage stakeholders" (Patel *et al.*, 2007): by providing an opportunity for discussion, such studies can help stakeholders to share their visions of both present and future contexts.

In participatory studies, scenarios have often been designed by research teams themselves, for the purpose of analysis, evaluation and/or discussion with various stakeholders (e.g. Bacic *et al.*, 2006, Dockerty *et al.*, 2006, Tress & Tress, 2003), sometimes to include stakeholders' preferences (e.g. Tompkins *et al.*, 2008), recommendations (e.g. Lippe *et al.*, 2011) or objectives (e.g. Nidomulu *et al.*, 2007). When scenario design per se has been participatory, it has often resulted in qualitative scenarios (e.g. Walz *et al.*, 2007; Kok *et al.*, 2006), i.e. narratives/storylines. Translating these into quantitative

scenarios that are required for model simulations can be difficult (Alcamo, 2008a, pp. 123-150) and no explicit procedure for making such a conversion has yet been described in the literature (Clavel *et al.*, 2010). Studies describing this type of conversion exist (e.g. Therond *et al.*, 2009; Ronfort *et al.*, 2011) but interactions between stakeholders and modellers occurred prior to modelling.

The objective of this work was thus to produce, test on a case study and evaluate a method for the participatory design and assessment of a quantitative scenario of cropping system localization in a region aiming at controlling phoma stem canker and increasing the sustainability of a new resistant gene, with the example of Rlm7-gene, introduced in some cultivars in 2004 and still efficient.

1.3. Materials and methods

1.3.1. Study area

The study area was the “Centre region” of France (46°N, 2°E, Figure 3.1), which is France’s main producer of winter oilseed rape (WOSR), providing 20% of the total French production in 2010 on about 15.7% of the region’s arable land (source: Agreste). A threefold increase in the area cropped with WOSR has occurred in the “Centre region” since the early 90s, from 92300 ha in 1990 to 305300 ha in 2010 (source: Agreste).

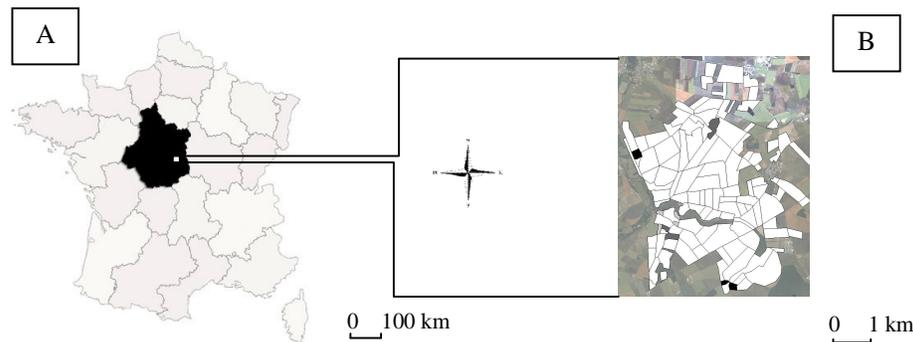


Figure 3.1. Location of (A) study site (white rectangle) and (B) landscape modelling support (white: cropped lands; black: uncropped lands, i.e. farmhouses; forests; fallow lands)

This region has experienced numerous phoma stem canker epidemics, which were particularly severe in the late 90s. These large epidemics were due to the rapid loss of a specific resistance efficacy (Rlm1), which has been intensively used in the “Centre region”: registered in 1992 and widely introduced in 1995, cultivars with this gene represented more than half of the total acreage of WOSR grown in 1998-1999 (Rouxel *et al.*, 2003).

The precise landscape used for simulations (step 5 of the method, Figure 3.2) is located in the “Centre region”, around Civray (Figure 3.1). An area of 121 fields was chosen (Lô-Pelzer *et al.*, 2010a), whose landscape characteristics and cropping practices are representative of the region according to local experts (Regional CETIOM: the French technical centre for research and development of oilseed

Variable	Value
WOSR frequency	31% ⁵⁰
Sowing dates	from 22/08 to 09/09; about 86% of WOSR areas sown between 25/08 and 04/09
Mean sowing densities	44 seeds.m ⁻² for hybrids and 62 seeds.m ⁻² for lines
Nitrogen fertilisation	13% of WOSR areas with organic nitrogen fertilisation at sowing
Cultivars	19% of WOSR areas sown with Rlm7-cultivars; 75% of WOSR areas sown with high level of quantitative resistance cultivars; 5% with cultivars with a low level of quantitative resistance; 1% of WOSR areas sown with susceptible cultivars
Tillage after WOSR harvest	28% of WOSR mouldboard ploughed after harvest; 21% with one stubble breaking operation, followed by one harrow operation and one chisel operation; 21% with one stubble breaking operation only; 12% with one harrow operation only; 18% with one stubble breaking operation followed by one chisel operation (7%), one harrow operation (7%) or one stubble breaking operation (4%)
Autumn application of Fungicide/growth regulator	On 63% of WOSR areas

Table 3.1. Main characteristics of reference scenario of the study area in “Centre region” (France), based on farmers’ interviews about their cropping practices during the period 2004-2008

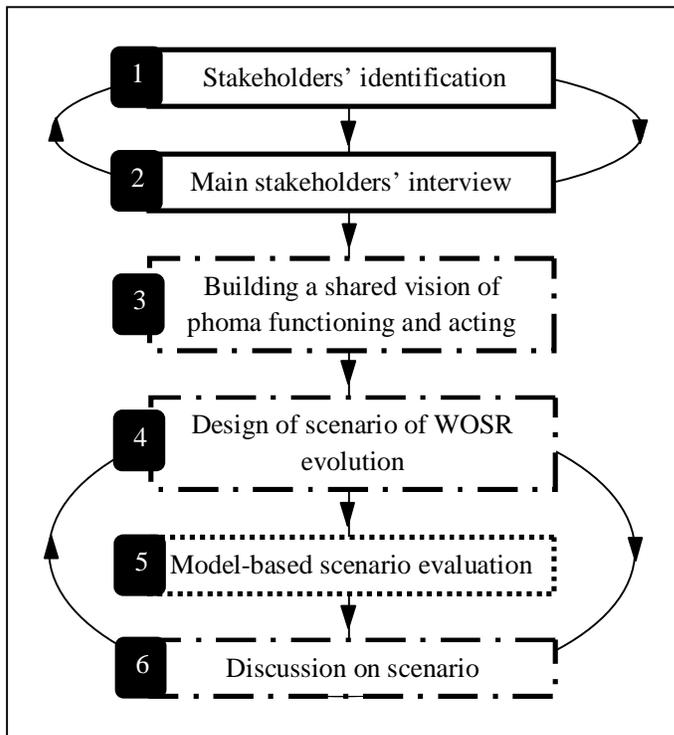


Figure 3.2. Schematic representation of the methodological approach developed in this study. Circular arrows represent feedback loops.

Box lines reflect the involvement of stakeholders in the different steps: boxes bordered by dotted lines indicate no interaction with stakeholders; boxes bordered by solid lines represent involvement of some stakeholders, with information derived from other sources (e.g. literature, national statistics); boxes bordered by dashed+dotted lines represent participatory workshops.

⁵⁰ A cette fréquence de colza est associée une diversité de rotations (rotations de 2 à 6 ans, voir Annexe B).

production). Present-day cropping systems, described in previous studies (Lô-Pelzer *et al.*, 2010a) are composed of about 31% of oilseed rape per year throughout the considered landscape (Table 3.1) and mean field size is 14 ha. These data are in accordance with statistical data (source: SCEES Enquêtes Pratiques Culturelles 2006) and expert knowledge (interviews of the main stakeholders, cf. description in Chapitre 3.1.3.2.3 and Table 3.1). These data can thus be considered as representative of the region, regarding cropping systems and landscape characteristics.

This 17 km² zone extends from 46°56'07.05'' to 46°59'42.4''N and from 02°07'10.3'' to 02°11'26.9''E (Figure 3.1). It is composed of 21 ha of forests (3 fields), 12.4 ha of farmhouses (2 fields), 9.2 ha of fallows (4 fields) and 1656.8 ha of cropland (112 fields). Five main soil types have been identified in the studied area and were applied proportionally to their importance to the fields (Lô-Pelzer *et al.*, 2010a), their regional importance being based on regional field monitoring during the years 2004-2005 and 2005-2006 (189 fields in total) (unpublished data from CETIOM).

Weather data for this zone provided by Météo France were used (weather station located at 46°59'30" N 02°10'54" E). This zone often experiences mild wet autumns, which can favour phoma stem canker development on WOSR leaves (e.g. in controlled environment experiments; Huang *et al.*, 2006).

1.3.2. Methodological approach

1.3.2.1. General framework of the method

The method developed combines participatory scenario construction, numerical modelling and participatory scenario evaluation, all the main stages involving stakeholder participation (Figure 3.2).

This method is composed of six steps. Firstly, the research team identified the types of stakeholder to be involved in the study (based on previous studies and expert knowledge from CETIOM, producing local information about cultivars). Secondly, the research team made a survey of the most relevant stakeholders, to become familiar with regional agricultural systems and stakeholders' organizations for oilseed rape production and collection and get insight in their involvement in phoma management. Thirdly, the research team with the stakeholders built a scheme of their shared vision of phoma, in order to jointly identify cropping practices affecting phoma stem canker and stakeholders influencing these practices. Fourthly, the research team and the stakeholders built scenarios of possible future cropping systems in the region and their spatial management, accounting for cultural practices, and taking account of stakeholders' strategies, in order to understand how they envisage the future. The fifth step of the method, realized exclusively by the research team, is composed of the evaluation, by simulations with SIPPOM-WOSR, of these scenarios to quantify their efficiency for disease control (i.e. pathogen population size and longevity of resistance). The last step of the method is the evaluation and discussion with stakeholders of the scenario performances and their feasibility, possibly leading to scenarios' modifications as a result of these discussions.

1.3.2.2. Identification of relevant stakeholders

The first step to implement a local participatory scenario design is the identification and choice of all stakeholders whose activities could be substantial for local management of the concerned issue. It was first realized by the research team, based on a reflection on the possible technical levers for the disease control and on the stakeholders impacting these levers.

The stakeholders concerned are firstly the farmers who make the decisions about crops and their location and management techniques (Bacic *et al.*, 2006) and thus affect the landscape (Primdahl, 1999). However, their choices are constrained or guided by others who influence these choices (Bacic *et al.*, 2006) through advice, commercial constraints, available inputs (e.g. varieties), policy framework, advertisements, incentives etc. Stakeholders from the whole WOSR sector have also to be involved in the study. Then, in order to ensure that all methods for controlling phoma could be

proposed for scenario construction, scientists' involvement in the study was decided to share recent knowledge on disease behaviour.

1.3.2.3. *Interview of the main stakeholders*

After identification of the main stakeholders to be implied in the study (Figure 3.2), gaining knowledge on local practices and local stakeholders is necessary, in order not to omit stakeholders who should be relevant and not pre-identified by research team (Reed, 2008). Thus, in order to understand cropping system practices and stakeholders' regional organization and to identify relevant participants to be included in our study, we interviewed the main local stakeholders who have an in-depth knowledge of WOSR growing in the region: local CETIOM, main technical advisors (the local Chamber of Agriculture) and the main cooperative.

Interviews were semi-directive, with questions about (1) current phoma stem canker disease problems (where and why it occurred), (2) the main factors (WOSR cultivation techniques, rotations, cropping system/crop management location factors) affecting phoma management, (3) who would be appropriate to involve in the study, with construction of a scheme representing stakeholders' concerns and courses of action (e.g. van den Belt *et al.*, 2010) over phoma management, i.e. over factors affecting disease management.

This step helped the research team to identify all relevant stakeholders to be involved and to build the reference situation (i.e. baseline situation) reflecting the current risks of phoma epidemics. If detailed local data on current cropping systems and locations were available, information from those interviewed was analysed to test the validity of the available data and, if necessary, adjust these data. If no detailed data were available, numerical data for reference situation design were derived from information on cropping systems collected during interviews.

1.3.2.4. *Building a common scheme of phoma behaviour and effects of stakeholders*

Once all stakeholders to be involved were identified and research team gained insight into regional cropping and organisational characteristics through interviews, the challenge was to involve stakeholders and build a common background on the disease functioning (Figure 3.2). Indeed, as no serious phoma epidemic has occurred in the region since 2002, the control of phoma stem canker by lengthening the duration of effective resistance is now rather an academic topic. Thus, in order to involve stakeholders in this issue, make them aware of the possible consequences of a return of phoma stem canker on WOSR, we decided to build with them a scheme of their shared vision of phoma stem canker, taking inspiration from the ARDI (Actors, Resources, Dynamics and Interactions) method (Etienne *et al.*, 2011). The objectives of this scheme were fourfold: (i) for the stakeholders to identify the cultivation techniques (which are under their control) which might affect the disease; (ii) to give stakeholders confidence in the modelling framework supporting simulations (SIPPOM-WOSR) and its underlying hypotheses, through a comparison of the scheme on resources and dynamics they created and the SIPPOM-WOSR functioning scheme (i.e. global adequacy between their representations and the computer model (Aumann, 2011)); (iii) to ensure stakeholder representativeness; (iv) to involve stakeholders in a learning process regarding the processes involved in stem canker management.

During a four-hour collective working session, participants were invited to present their visions of the behaviour of the disease and potential technical levers, and of the stakeholders whose actions may have impact phoma control methods (e.g. cultivar choice, residue management), i.e. to represent their mental model on disease functioning and acting stakeholders. We gathered stakeholders' opinions in four steps. First, study participants were asked to identify the types of stakeholders having an impact on phoma stem canker management, i.e. on crop choice and cultivation techniques impacting the disease. Stakeholders were differentiated between direct and indirect stakeholders, i.e. respectively

between the ones making the technical choice and the ones influencing/constraining the choice for these technical choices (e.g. cultivar choice). Then, stakeholders identified resources, which are the “goods or products used by any of the stakeholders” (Etienne *et al.*, 2011), e.g. cultivar, fertilization product, residue management. Then they highlighted the interactions between stakeholders and dynamics of the resources, e.g. farmer cultivar choice impacts yield. For interactions and dynamics, we asked participants to describe the process with a verb, making sure all participants agreed with both the dynamic/interaction and its description.

1.3.2.5. Scenario design of winter oilseed rape evolution

All stakeholders being now aware of the levers for phoma stem canker management, a second four-hour working session was devoted to scenario design of future WOSR cropping conditions (Figure 3.2). A scenario is composed of necessary detailed inputs for SIPPOM-WOSR simulations, i.e. specification (value) for the seven variables, defined yearly at field and/or at regional scale: WOSR acreages, sowing dates, sowing densities, cultivars (with or without the RlmX-gene), nitrogen fertilization at sowing (product type and fertilization rate), autumn fungicide application (date), tillage after WOSR harvest.

At the beginning of the session, a short presentation was made to:

- Describe model behaviour, required inputs and possible outputs, and identify precisely the variables for which the scenarios could differ (i.e. variables described in Table 3.1)
- Present characteristics of the simulation support landscape
- Present a reference scenario representing recent local practices (Table 3.1): cropping systems and WOSR cultivation techniques, as well as cultivars (based on earlier interviews with farmers whose cropped fields (2004-2008) were considered in the simulation support landscape) and numerical simulation results of this scenario.

Then, stakeholders were asked to imagine futures/trends for WOSR in their region and to describe what contextual changes, either local or global (e.g. political, economic, epidemiological, etc.), would be necessary for such futures to materialize. To illustrate French national tendencies, national acreages of WOSR since 1989 (data Agreste) were presented. Finally, stakeholders were asked in an open discussion to illustrate the identified futures with detailed WOSR acreages (linked with crop sequences) and cultivation techniques, that could affect phoma stem canker control, i.e. cropping characteristics corresponding to model inputs (variables of Table 3.1), including their quantitative assessments. As phoma stem canker control can depend on interactions between techniques (e.g. cultivar and sowing date, Aubertot *et al.*, 2004a), stakeholders were asked about combinations of cultural practices, as well as about the factors governing the location of cropping systems and crop management (e.g. relationships between soil types and cultivation techniques).

1.3.2.6. Scenario simulation with SIPPOM-WOSR

In order to assess consequences of management scenarios designed by stakeholders, numerical simulations of these scenarios were realized using the numerical modelling framework supporting simulations SIPPOM-WOSR (a Simulator for Integrated Pathogen Population Management) (Figure 3.2 and Figure 3.3). It is a spatially explicit model “linking epidemiological, population and crop model approaches”, enabling simulations of quantitative and qualitative evolution of phoma stem canker, i.e. population size and genetic structure, for localized cropping systems (Lô-Pelzer *et al.*, 2010a). The model integrates five sub-models (Figure 3.3).

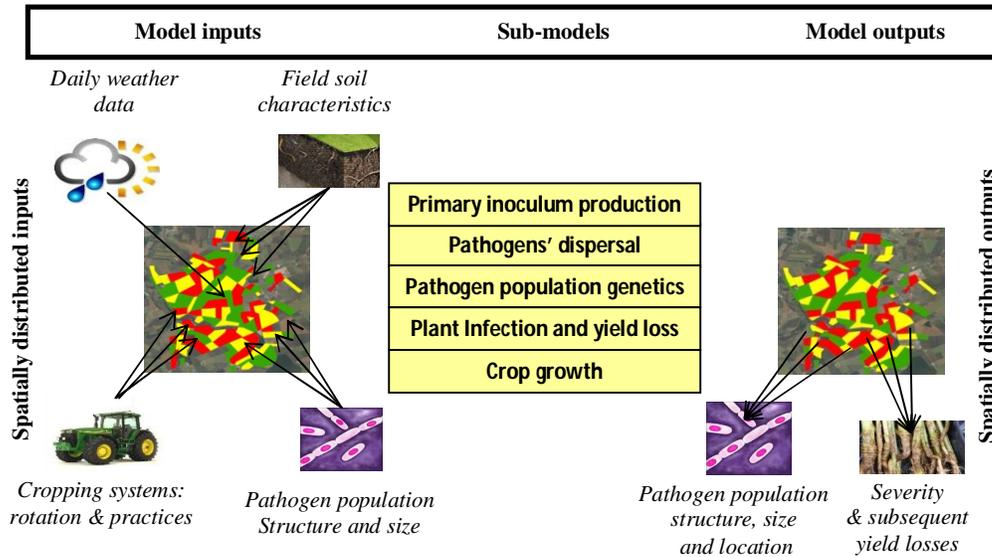


Figure 3.3. Structure, inputs and outputs of the model SIPPOM-WOSR (adapted from Lô-Pelzer *et al.*, 2010a)

Model inputs are a map of detailed cropping systems for each field (which is the simulation unit), weather data and the initial size and genetic structure of pathogen populations (Figure 3.3). Outputs, for each simulation year at field scale, are disease severity, yield losses due to phoma stem canker, and the genetic structure of the pathogen population (i.e. frequencies of virulent and avirulent pathogen for a major resistance gene, able and unable respectively to infect WOSR varieties with this resistance gene). Initial frequency of virulent pathotypes on RlmX-gene cultivars has been fixed to 10^{-7} of total pathogen population size.

Scenarios defined by stakeholders were run with the model for simulations of five years (one year for model initialization and four years of simulations per se). When no specific rule was available for crop or crop management allocation, these were allocated at random to fields using R software V2.10.0 (R Development Core Team, 2009) to obtain a mixed landscape, changing every year, for both WOSR cropped area and WOSR management techniques. There were three replicates for these allocations.

1.3.2.7. Discussion on scenario evaluations

Finally, the last step of the method consisted in a third four-hour workshop was held to present and discuss the numerical evaluation of scenarios. After a brief presentation of model characteristics and of the previously designed scenario, scenario simulation results for the last simulation year and the whole landscape were presented: graphical representations of all scenarios of last year's simulated results: (i) virulent pathogen frequency vs. simulated yield losses and (ii) pathogen population size vs. simulated

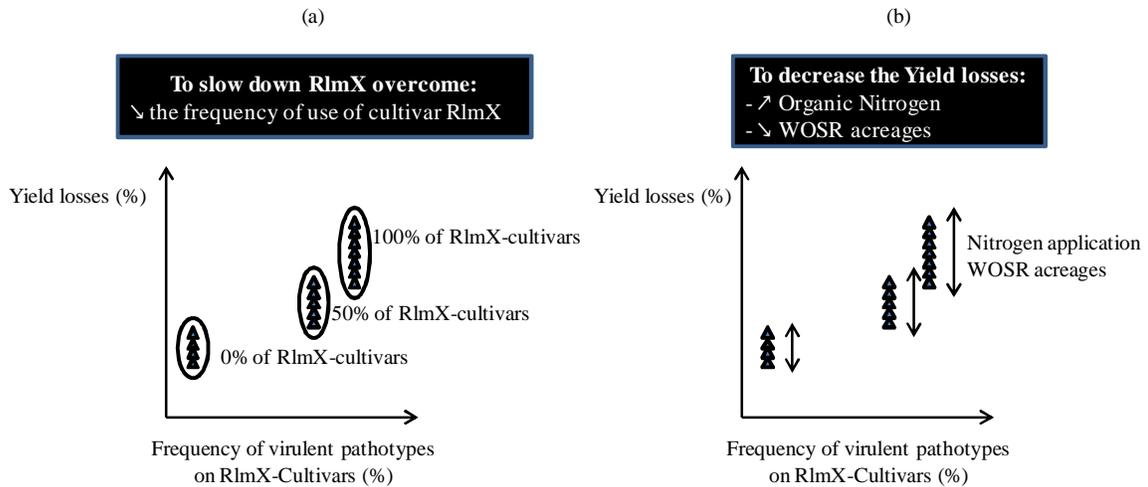


Figure 3.4. Examples of graphical representations of scenario evaluations per trend, highlighting the most significant cropping characteristics for the considered output.

(a): Main input impacting the frequency of virulent pathotypes on RlmX-cultivars ; (b): main input impacting the yield losses.

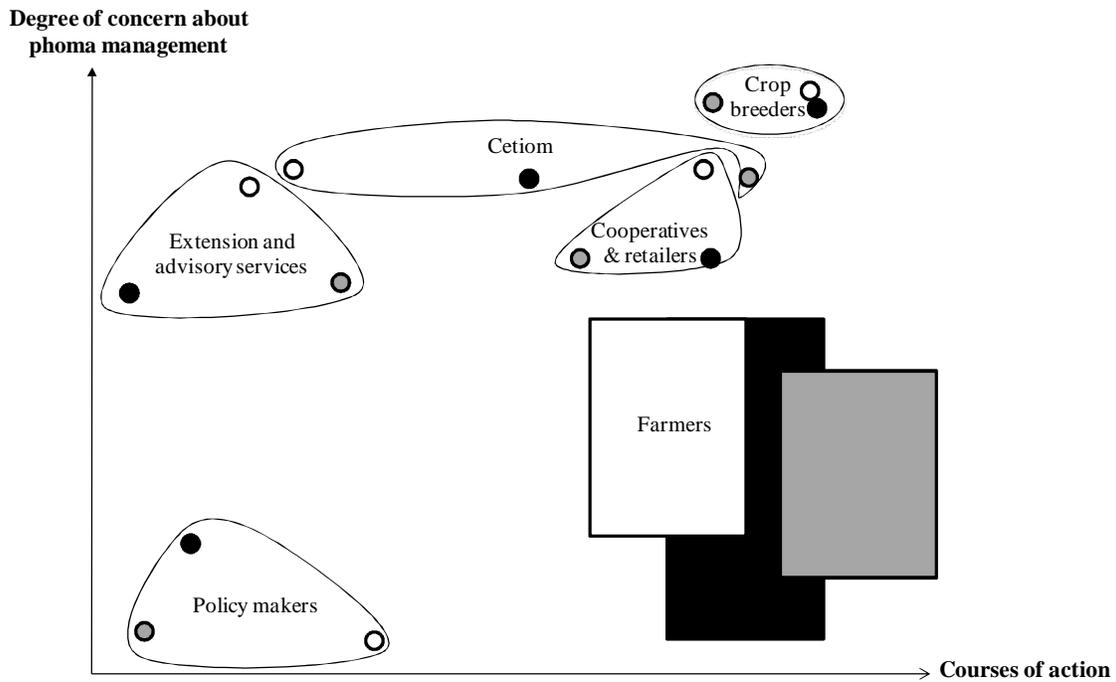


Figure 3.5. Stakeholders' involvement in the management of phoma stem canker of oilseed rape: visions of the main stakeholders about stakeholders' concern and courses of action.

Empty symbols: vision of the main cooperative; grey symbol: vision of the Chamber of Agriculture; black symbol: vision of the Specialist Technical Organization (CETIOM)

yield losses. These graphical representations were realized by trend, highlighting graphically the more important input variable (i.e. cropping characteristic) that impacted the concerned output (e.g. yield losses) (Figure 3.4). For these main input variables, model outputs were compared between extreme values for this input, e.g. if the considered input would be the WOSR acreages, ranging from 33 to 50% of the cropped area, yield losses due to the increase of WOSR would be calculated and presented to stakeholders.

During this presentation, stakeholders could ask for details or explanations at any time in order to increase their insight into the results and remark on scenarios and their simulations. After the presentation, they were asked to give their analysis and to interact on the scenario simulations and possible new scenarios they could imagine, to initiate an iterative process between scenario design and discussions (Figure 3.2).

1.4. Results

1.4.1. Identification of and interviews with stakeholders

Three types of stakeholders were interviewed: the main cooperative (representing 65% of oilseed rape collection in the area), the local Specialist Technical Organization (two persons from CETIOM: the regional advisor and the manager of local crop experiments) and the local Chamber of Agriculture.

Their visions of current agricultural systems and crop management strategies for WOSR were largely in agreement with each other and with detailed data collected on the simulation area by farmer interviews. Their general vision of stakeholders' organization for oilseed rape production/collection and involvement in phoma stem canker management (Figure 3.5) were also consistent: the interviewed stakeholders considered that (i) policy makers have a moderate impact on courses of action and are not concerned by phoma management; (ii) extension and advisory services are highly concerned but have limited courses of action; (iii) cooperatives and retailers are highly concerned and have several courses of action; (iv) breeders have the most concern about phoma management and the most courses of action. According to the interviewed stakeholders, farmers' behaviour is more contrasting. Farmers' concern on phoma depends on their experience, i.e. if their crop already suffered from phoma stem canker. Interviewed stakeholders had different opinions on the Specialist Technical Organization (CETIOM) behaviour: their levels of courses of action were considered to be few by the main cooperative and many by the Chamber of Agriculture.

These stakeholders affect WOSR management directly or indirectly in different ways:

- Farmers are the final decision makers for oilseed rape cultivar choice and practices. They can be advised and influenced by the extension and advisory services and by cooperatives/retailers. Their practices can be constrained by policy, e.g. on dates for tillage practices.
- Crop collectors (cooperatives and retailers) affect crop management in two ways: (i) by the choice of inputs they sell, e.g. fungicides and seeds, they can restrict fungicide and cultivar choice (and associated genetic characteristics, i.e. resistance); (ii) by their advice on cultivar choice, according to objective criteria (field observations and on-site experiments), e.g. soil types, cultivar phenology. Both crop management methods were strategy/business-dependent.
- Breeders influence cultivar characteristics, e.g. phenological characteristics, yield potential, sensitivity to disease (resistance type – qualitative and/or quantitative and quantitative resistance level) and thus their potential availability for cooperatives/retailers.
- The local Specialist Technical Organization (CETIOM) acts by influencing breeders and their experiments, which are communicated to crop collectors/retailers and extension and advisory services.

- Extension services and advisory services (Chamber of Agriculture, associations managed by farmers for agricultural technical studies and development) communicate to farmers and between advisory services experiment results on WOSR crop management strategies.
- Policy makers, through policies with a single objective (e.g. limitation of nitrate losses) may influence the type or timing of cultural practices.

Their degree of involvement in/concern about WOSR crop management for phoma stem canker depends on the possible consequences of the disease's return:

- yield loss for farmers (and indirectly for advisory services), cooperatives and CETIOM;
- need for innovation for crop breeder in case of resistance failure;
- very low direct impact for policy makers.

Stakeholders' courses of action will thus impact phoma stem canker management either directly (e.g. farmers' choices of cultivation practice; cultivar design by crop breeder; cultivar selection by cooperatives/retailers) or indirectly (e.g. communication on cultivation practice or cultivar). Although these courses of action cannot be directly taken into account in the model SIPPOM-WOSR, they are translated into actions on cropping systems, which are the main inputs of the model (Chapitre 3.1.4.4). Their concern will impact model output to be studied by research team.

1.4.2. Visions of phoma behaviour and active stakeholders

This step resulted into two schemes presenting (a) resource dynamics (resources: cultivation techniques, stubbles, etc.) affecting phoma stem canker and the type of relationships between the resources; (b) stakeholders' impacts on cultivation practices (e.g. testing, regulation) and type of relationships between stakeholders (e.g. communication) (data not shown). These schemes, collectively constructed during the first workshop, showed that the main relevant stakeholders were involved in the study, i.e. every stakeholder included in the stakeholders' scheme (b) was identified in steps 1 and 2 and invited to workshops. Direct comparison between the resource dynamics scheme of the model (based on Lô-Pelzer *et al.*, 2010a; 2010b) the one designed by stakeholders (a) highlighted that the model structure was in accordance with stakeholders' vision of the disease (although some factors are absent from the model, e.g. working time, machine availability). Attendance at this workshop was high (15 people), with representativeness of all stakeholders' type and some diversity within type (e.g. two crop breeders, four for extension and advisory services) (Table 3.2).

Type of stakeholder	Step 2. Interviews	Step 3. Scheme building	Step 4. Scenario design	Step 6. Scenario results discussion
Decision makers				
Farmers	-	1	1	1
Crop collectors	1	1	2	2 (<i>1</i>)
Crop breeder	-	2	0	0
CETIOM	2	2	0	<i>1</i>
Extension and advisory services	1	4	2	1
Policy makers	-	1	1	0
Other stakeholders				
Researchers	-	5	3	3
Total	4	15	8	7

Table 3.2. Type and number of stakeholders attending to the four steps of the method stakeholders were involved in.

See details on the types of stakeholders in Figure 3.2 and Chapitre 3.1.4.1. Italics underline the participation of a new stakeholder from an organization that had already attended to a previous workshop.

Main Trend	Context change	Main variable changed	Range of main variable change	Other changed variables
A. Increase of WOSR areas (in comparison with the reference scenario)	Present economic trend; biofuel production increase WOSR net return decrease		33-50 % of WOSR per year	Cultivars, tillage, sowing dates, nitrogen fertilisation frequency, fungicide frequency, climate
B. Decrease of WOSR areas (in comparison with the reference scenario)	Nitrate regulation change, restricting time-windows for tillage Policy change to promote longer crop rotations	Crop sequences	26-30% of WOSR per year	Nitrogen fertilisation frequency, fungicide frequency, climate
C. Increase of areas with mouldboard ploughing after WOSR harvest	Overcome of currently used qualitative resistance (RlmX) Banning of glyphosate	Tillage frequency after WOSR harvest	30-50% of areas with mouldboard ploughing after WOSR	WOSR frequency, nitrogen fertilization, fungicide frequency, climate

Table 3.3. Main characteristics of the three trends collectively designed during the first workshop. WOSR: Winter Oilseed Rape; RlmX: specific resistance currently cropped; s.m-2: seeds per square meter

1.4.3. Participatory scenario design

A summary of the future trends imagined by the stakeholders was made in order to get structured scenarios with all the details required for model inputs. So-called after “increase” and “decrease” (e.g. of WOSR areas) are implicit comparisons with the reference situation (Table 3.1), as expressed by stakeholders during the workshop (Table 3.2).

Three main trends were identified (Table 3.3), corresponding to different contextual changes (political, epidemiological, economic or regulatory contexts). Trend A assumes an increase in WOSR area (in comparison with the reference situation), which seems the most plausible to the different stakeholders, in accordance with the national trend and the development of biofuel. This global trend results in shorter crop rotations (e.g. WOSR-Winter Wheat-Barley becomes WOSR-Winter Wheat), which are associated with varieties containing quantitative and/or qualitative resistance; different possible areas with mouldboard ploughing and an increase in autumn nitrogen applications. Trend B assumes a decrease in WOSR area, which might occur if WOSR became less profitable or if policies were to change, e.g. if nitrate regulations were to increasingly restrict the time window for tillage practices, work organization could lead to a need to diversify crops to decrease working pressure at a certain time. This trend was associated with longer crop sequences, current varieties and cultivation practices, except for the increase in autumnal nitrogen applications. Trend C assumes a significant increase in areas with mouldboard ploughing after WOSR harvest, which would occur either if the current qualitative resistance would quickly be overcome and thus become inefficient, or if the herbicide glyphosate would be banned, in conformity with current policies to reduce pesticides. This trend is associated with cultivars with quantitative resistance, an increase in autumnal nitrogen applications and 10% of the WOSR area receiving fungicide applications (Table 3.3).

Workshop participants (Table 3.2) associated the three trends with two climatic datasets: (1) current data (2003-2008); (2) weather data favouring development of phoma stem canker epidemics (i.e. with wet mild autumns). They decided applications of fungicides on part of WOSR only for the second weather dataset.

For the three trends, stakeholders identified soil type as the location factor for crop rotation, tillage practices, nitrogen fertilization and fungicide applications. No association between cropping practices was suggested at this stage, except for the sowing densities, which were determined by cultivars.

For the three trends, stakeholders suggested extreme values for the different variables. For instance, for trend A, stakeholders proposed an increase from 33% to 50% of the whole cropped area sown with WOSR. A stakeholder suggested a two-year crop rotation (WOSR – Winter wheat), leading to a 50% WOSR frequency. As another stakeholder questioned the sustainability of such a crop rotation, all stakeholders decided to test such a system, already occurring locally in some farms. However, in order to test a more locally represented and sustainable system for this trend, stakeholders also decided on a three-year crop rotation (WOSR – Winter wheat – Barley) leading to 33% of the local area cropped with WOSR. In order to compromise between the two WOSR acreages, the research team suggested scenarios with intermediate variable values (e.g. 42% of the whole area cultivated with WOSR), to try considering more plausible regional configurations and explore the consequences of making smaller changes.

Variable	Trend A: Increase of WOSR acreages	Trend B: Decrease of WOSR acreages	Trend C: Increase of mouldboard ploughing after WOSR cultivation
WOSR frequency -% of total area-	33; 42; 50%	26.7; 28.9; 30%	30; 33; 42%
Sowing dates	From 15/08 to 05/09 (peak between 20 and 30/08)	Reference values	
Mean sowing densities	45 s.m ⁻² for line cultivars; 35 s.m ⁻² for hybrid cultivars		
Nitrogen fertilisation -% of total area- (on shallow ; deep soils)	10% (20; 0); 22.5% (35; 10); 35% (50; 20)		
Cultivars	100% RlmX-cultivars; 100% with high partial resistant cultivars; 50% RlmX and 50% of high partial resistant cultivars	Reference proportions for RlmX and non-RlmX cultivars	100% of high partial-resistant cultivars
Tillage	0; 10; 20% of WOSR acreages	Reference values	30; 40; 50% of WOSR acreages
Fungicide	On 10% of WOSR acreages if wet and warm climate option; 0 otherwise		
Weather	Current (2003-2008); warm and wet		
Number of scenarios	162	18	54

Table 3.4. Characteristics of the various scenarios constructed by participants of the second workshop WOSR: Winter Oilseed Rape; reference: values of reference scenario. Total number of scenarios per trend is obtained by multiplying the number of possibilities for each variable

Once workshop participants had defined the main variable specification for a trend (i.e. WOSR crop areas for trends A and B vs. mouldboard-tilled areas for trend C ; Table 3.3 and Table 3.4), ranges for other variables were defined. Participants decided to define these ranges independently for each variable. All combinations were thus simulated.

For instance, for trend A, stakeholders defined (Table 3.4): (i) three specifications for sown cultivars (100% of WOSR areas cultivated with RlmX-cultivars; 50% with RlmX-cultivars and 50% with quantitatively resistant cultivars; 100% with quantitatively resistant cultivars); (ii) one specification of WOSR sowing date (from 15th August to 5th September, with a peak between the 20th and the 30th of August); (iii) one specification for sowing density (35 gr.m⁻² for cultivars with RlmX-resistance vs. 45 gr.m⁻² for cultivars with partial resistance); (iv) three specifications for organic nitrogen fertilization at sowing (fertilization on 20% of annual WOSR cropped areas with shallow soils vs. fertilization on 5% of these areas with shallow soils and 10% of these areas with deep soils vs. fertilization on 50% of these areas with shallow soils and 20% on deep soils); (v) two specifications for fungicide treatment depending on weather conditions (10% of annual WOSR areas with one fungicide (metconazole) application for the weather specification 2, i.e. with wet warm autumns, vs. no application in current weather); (vi) three specifications for mouldboard tillage practices after WOSR harvest (no mouldboard ploughing vs. mouldboard ploughing on 10% of annual WOSR cropped areas vs. mouldboard ploughing on 20% of annual WOSR cropped areas). As stakeholders did not mention links between variable values, all combinations of variable specifications lead to 162 scenarios for trend A. Following the same methodology for trends B and C, the total number of scenarios was 234 for the three trends (Table 3.4).

1.4.4. Model-based scenario simulation

Simulations of the 234 scenarios had to be performed with the modelling framework SIPPOM-WOSR. As stakeholders did not define specific localization factors for WOSR and/or practices during the scenario construction workshop (except for tillage and nitrogen fertilization, linked with soil type), three replicates for the random spatial distribution of crop and practices were used, leading to 702 scenarios (234 scenarios x 3 replicates) (Figure 3.6).



Figure 3.6. Example of one year-random cultivar allocation (3 replicates of the same scenario).
Cv : cultivar ; WOSR: Winter OilSeed Rape

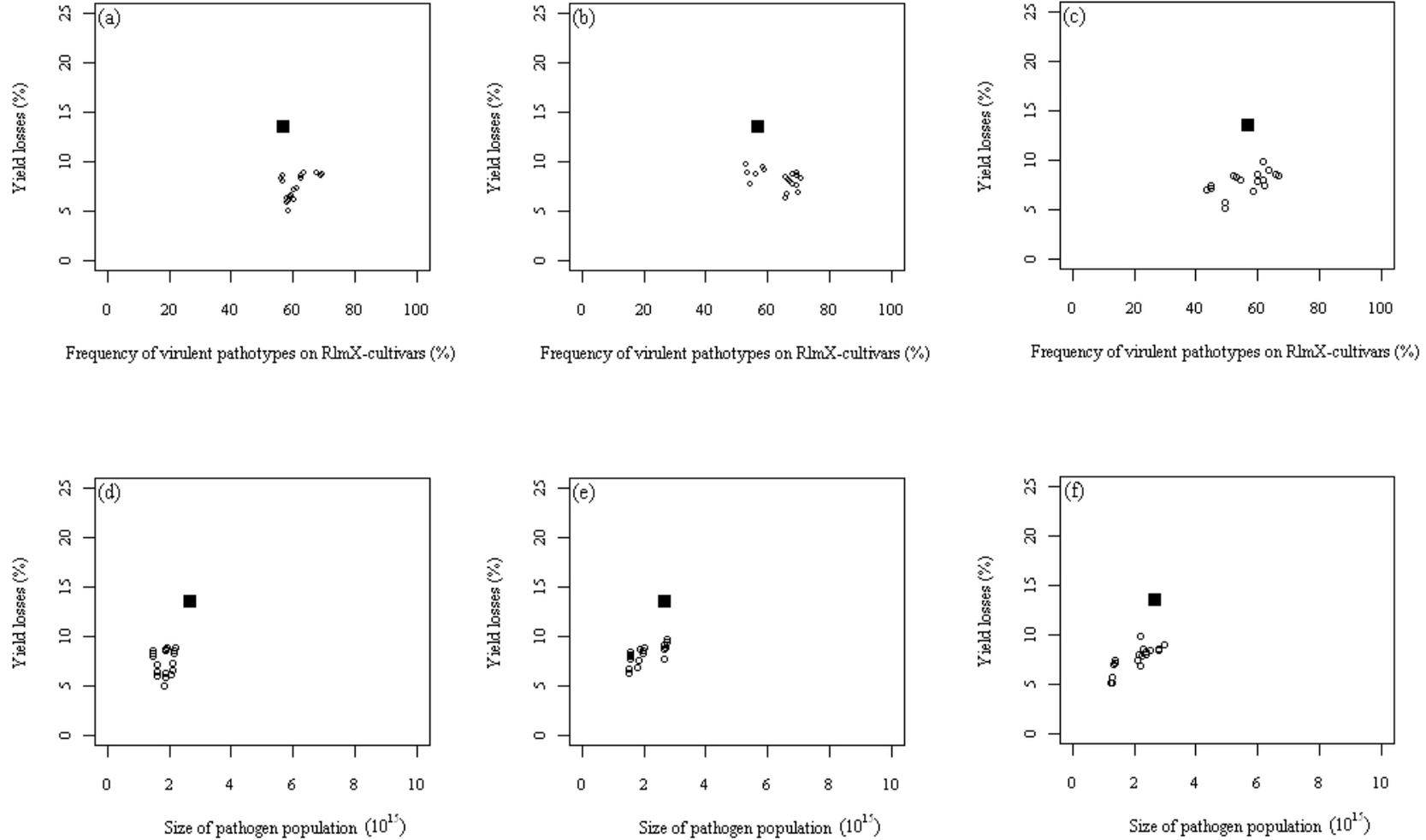


Figure 3.7. Scenarios simulation results (three replicates): yield losses depending on Frequency of virulent pathotypes on RlmX-cultivar (figures a, b, c) and Size of total pathogen population (figures d, e, f) for trend B.

Trend B (18 scenarios): Decrease of WOSR areas in link with economical/political changes. Round symbols hold for scenarios of trend B; squared symbol holds for reference situation.

1.4.5. Scenario evaluation and discussion with stakeholders

1.4.5.1. Scenario evaluation

Model-based simulation of co-designed scenarios resulted in very diverse results for the three main output variables, i.e. frequency of virulent pathotypes on RlmX-cultivars, yield losses and size of the total pathogen population, i.e. including all pathotypes (Figure 3.7 and Figure 3.8, -only one replicate presented for trends A and C for brevity-). Trends B and C (decrease in WOSR acreages and increase in mouldboard ploughed areas respectively) showed lower yield losses and sizes of total pathogen population than trend A (increase in WOSR acreages) (Figure 3.7 and Figure 3.8). Trend C showed lower frequency of virulent pathotypes on RlmX-cultivars than trend B. Trend B mean frequency of virulent pathotypes on RlmX-cultivars was lower than for trend A (Figure 3.8). Trend A displayed very variable results for frequency of virulent pathotypes on RlmX-gene, from 0 to 100% of virulent pathogen (Figure 3.8). This is due to the large extent explored for the model input frequency of RlmX-cultivars in the area in this trend (Table 3.4). For trend A, only scenarios with no RlmX-cultivars had lower frequency of virulent pathotypes on RlmX-gene than the reference situation (Figure 3.8).

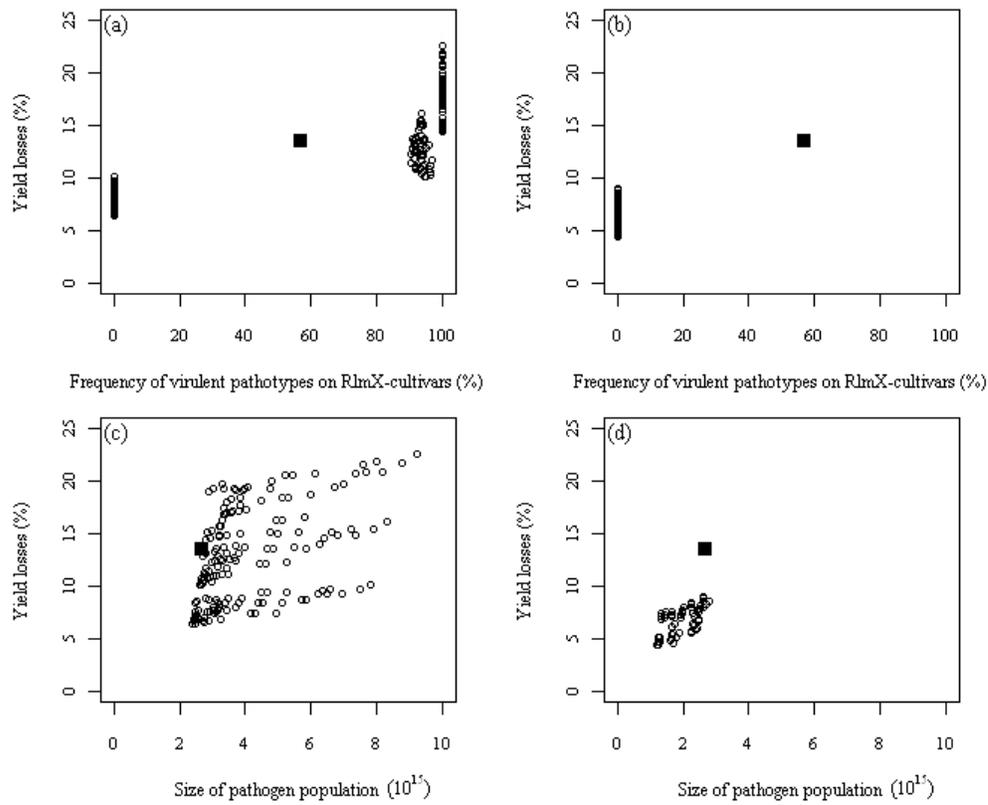


Figure 3.8. Scenario simulation results (only one replicate presented): yield losses depending on frequency of virulent pathotypes on RlmX-cultivar (figures a, b) and size of total pathogen population (figures c, d) for trends A and C.

Trend A (162 scenarios): fig. a and c; Trend C (54 scenarios): fig. c and d.

Round symbols represent scenarios of trends A and C; square symbols are for the reference situation.

Trends B and C had lower yield losses and sizes of the total pathogen population than the reference situation (Figure 3.7 and Figure 3.8). Trend C had mostly lower frequency of virulent pathotypes on RlmX-gene than the reference, due to the absence of RlmX-cultivars in this trend, consistent with trend A results with the same cultivar configuration. Trend B displayed different frequencies (but rather high) of virulent pathotypes on RlmX-cultivars, which highlighted the importance of rules for locating and combining crops and practices (Figure 3.7).

1.4.5.2. Scenario collective discussion

During the workshop, study participants (Table 3.2) expressed to the research team that scenarios evaluations highlighted relevant features to them, especially information on input ranking for phoma stem canker management (e.g. residue management and cultivar choices effects on phoma at the regional scale), from which they could adapt their technical advices and practices. They linked it to the temporal and spatial scales of the model, which could help to see consequences of individual choices on phoma stem canker management. Indeed, although they acknowledged that field scale is their main working scale, past phoma epidemics showed to them the necessity of considering the inter-annual and inter-fields processes. Moreover, discussions also highlighted some elements stakeholders found missing in the model, especially regarding crops sometimes grown during summer to prevent nitrate leaching (intercropping practices, which are to become compulsory in 2012) and crop mixtures (e.g. sowing WOSR with legumes as cover crop). According to stakeholders, this could affect phoma stem canker management: for instance, a legume-WOSR intercropping would increase nitrogen availability, possibly affecting stem canker if nitrogen fertilization practices remained unchanged. Using their experience of cultivar behavioural change over time, study participants also challenged the way partial resistance was taken into account in SIPPOM-WOSR, i.e. steadily decreasing the disease severity by a stable scale factor. They suggested introducing information on the decrease of partial resistance efficacy with time, which they had observed in the field. Such model modifications would be likely to affect scenario ranking for outputs.

During the discussion of the simulation results the reference situation was challenged. Although it had been presented to stakeholders during the second workshop, prior to the participatory scenario design, stakeholders asked for its reappraisal, concerning cultivars, as well as types and dates of tillage practices. This reference situation was considered too local, i.e. taking into account very local contextual issues as for instance the nearby presence of pig farms affecting the type, level and frequency of organic nitrogen fertilization. Thus, study participants were willing to explore a new reference situation, that differed in: (1) nitrogen fertilization practices: organic nitrogen application frequency and dose had to be decreased (from 13 to 10% of WOSR areas and from 62 to 45 kg N.ha⁻¹ respectively); the type of fertilization product had to be changed; (2) soil tillage: date of mouldboard ploughing had to be delayed to occur around next year's WOSR sowing time; mouldboard ploughing had to be decreased on shallow soils; soil tillage other than mouldboard ploughing had to be updated; (3) sowing density had to be increased in shallow soils; (4) the chosen weather series representing warm wet autumns had to be changed to a specific year stakeholders remembered as presenting those characteristics.

At the end of the workshop, stakeholders discussed the driving forces necessary for cropping practice changes and the impacts of such changes. For example, increasing WOSR frequency in the crop rotation would involve a reduction in deep soil tillage (more direct sowing) due to lower working-time availability. For instance, one participant insisted on the "attractiveness of increasing crop rotation duration" with regard to phoma stem canker management but put it into perspective with economic and agronomic contexts: "such an option would face profitability and realization problems, as farmers would have to grow for instance sunflower, which is less profitable (its price is falling and it competes

with winter wheat) and hard to grow due to its water requirement and susceptibility to bird damage”. Study participants lacked economic information to judge scenarios, to be able to put into perspective yield losses due to stem canker and profitability at the rotation scale.

Finally, the participants agreed that given the current weather conditions, unfavourable to phoma stem canker development, it would be interesting to couple SIPPOM-WOSR with models simulating other diseases, insects and weeds. They pointed out that tackling a disease, in this case stem canker, could affect other factors such as weed control. The latter requires higher WOSR sowing densities, which in turn would affect stem canker management. Coupling for instance SIPPOM-WOSR with a model simulating the effects of cultivar and cultural practices on another disease could reveal dual scenarios favouring one disease while reducing the other. This was associated by stakeholders with cultivar selection that may focus on one disease, potentially disregarding others and the effect of selecting resistant cultivars on yield components, e.g. oil content.

1.4.6. Discussion

We will here discuss the developed method, and not the results that are mainly case-specific.

In this paper we have proposed and tested a method of participatory quantitative exploratory scenario design, with phoma stem canker management as a case study. This method includes stages for stakeholders’ identification, analysis of their courses of action, participatory analysis of the processes involved in the issue and finally the design, analysis and discussion of future scenarios implying processes change and subsequent effects on phoma stem canker management, whose evaluations were model-based. Using this method, the case study for the “Centre region” highlighted possibilities to directly derive quantitative scenarios with a participatory approach, avoiding the classic trap of converting narratives into quantitative data (Alcamo, 2008a, pp. 123-150; Walz *et al.*, 2007) in spite of the topic’s complexity. This participatory future development provided insight into different types of drivers for the future (e.g. global changes: economics (price context), politics/economics (incentives), regulations (product bans), vs. local changes: epidemiological drivers) and the impacts of such futures on the agricultural context (crops and cropping practices), underlining aspects of the qualitative scenarios. Biological processes of phoma stem canker evolution were thus considered in this study, as proposed by Blackstock *et al.* (2007), “in the context of their social-economic drivers and responses”, taking into account local knowledge (Patel *et al.*, 2007) and local needs and priorities (Dougill *et al.*, 2006).

This study thus underlined the potential benefits of a participatory approach when dealing with complex processes taking place at large spatial and temporal scales. Through the different steps of the method, two-way learning took place: (i) researchers gaining insight into the local context, requirements for model improvements and how crop management depends on a changing set of constraints; (ii) study participants learning about the scale of stem canker management, its behaviour and possible control methods in face of change, and the future vision and strategy of other participants and their possible consequences for control of the disease. It thus helped stakeholders’ empowerment and capacity building to these knowledge and skills (e.g. Wallerstein, 1999; Blackstock *et al.*, 2007), which could help their possible incorporation into decision-making (e.g. van Asselt and Rijkens-Klomp, 2002), e.g. practice recommendations. For instance, a study participant insisted upon “the great impact of mouldboard ploughing on phoma management”, concluding he could advise it, depending on individual farming systems (e.g. available machinery, rotation). In this study, SIPPOM-WOSR had thus mainly a heuristic role (e.g. Sterk *et al.*, 2009), as it improved understanding of the disease functioning and management options in face of context change. The model thus provided a basis for discussion, facilitating a constructive dialogue (e.g. Peterson *et al.*, 2004; Videira *et al.*, 2004), mainly due to (1) the pre-specification of required inputs, especially regarding cropping

systems characteristics and (2) scenario evaluations, providing a risk assessment of changes in cropping practices. It helped study participants to focus on the necessary specifications impacting phoma stem canker management, whose scenario values were then driven by stakeholders' collective discussion. Thus the model acted as a "mediator" between the stakeholders and the concerned issue, although it constrained the scope and topic of discussion, including on system characteristics that, according to stakeholders, could affect the disease management. This included scenarios additional aspects that could not have been included in the model, highlighting the limitation of numerical models (e.g. Patel *et al.*, 2007) that could come from elements found missing in the model by the stakeholders (van den Belt *et al.*, 2004). Dialogue could thus drive further agronomic experiments, so that the model would evolve and fit more to the field reality perceived by stakeholders. Moreover, although the chosen time scale for scenario assessment was relevant for the issue (Rouxel *et al.*, 2003), it could be too short to evaluate other processes, such as the decrease of efficacy of quantitative resistance through time suggested by stakeholders. It could also be too short to assess counteracting effects with other processes, e.g. management of another disease or weed whose control depends partially on the levers of control for phoma stem canker. Using a more systemic approach (Dore *et al.*, 2008) tackling multiple issues to highlight possible dual effects would require high model adaptations, but could be of great interest to compromise cropping practices, considering e.g. the increase of intensity for WOSR residues favouring the control of phoma stem canker (Schneider *et al.*, 2006) but penalizing pollen beetle control (Rusch *et al.*, 2011).

Although we invited all kinds of stakeholders to join in the study and most attended at least one workshop, attendance fell away after the first meeting on disease behaviour (Table 3.2). A reason for the lack of interest is that since the disastrous phoma epidemics which occurred before 2002, the disease has been much less serious in the region due to the use of new resistant cultivars harbouring RlmX-gene (Rlm7 being the gene presented as an example to stakeholders), whose resistance has not yet broken down. Thus the priorities of many of the stakeholders did not match those of the research team, which was unknown to stakeholders prior to the study and had not received adequate publicity before the project began. Building a robust partnership, at the beginning of the study, with a key local actor could have helped to overcome this problem (Ericson, 2006), even when using a pre-developed model. Trust between research team and stakeholders is indeed a key element for successful participatory study (Voinov & Gaddis, 2008). Study institutionalization may also have helped participation (Cornwell, 2004; Reed, 2008). Although participation was relatively low (Table 3.2), a diversity of stakeholders was present at each step of the workshop (Wallerstein, 1999). The most influential institutions on the local WOSR growing conditions were present at each step (e.g. the main cooperative, responsible for 65% of WOSR collection; the Chamber of Agriculture). These institutions can be considered as the more relevant ones for this issue, their participation being thus of prime importance (Reed, 2008; Voinov & Bousquet, 2010). The systematic attendance of scientists having a deep understanding of the issue was also useful for scenario design (Pahl-Wostl, 2008). Finally, the large scope of scenarios designed by stakeholders may not have been improved by a larger participation, the consequences on phoma management being already very large (Figure 3.8 and Figure 3.7).

The confidence issue also led to model "testing" resulting in some exaggerated aspects of scenarios, such having only one WOSR cultivar grown in the area, leading to some kind of "sensitivity analysis" on cropping systems' inputs. Such scenarios were exploratory and led to extreme scenario assessment for the output variable "Frequency of virulent pathotypes on RlmX-cultivar". These evaluations, although biologically sound and in accordance with the functioning of the SIPPOM-WOSR model based on system dynamics, would most probably not occur in reality as there is a few chance that a unique cultivar would be grown in the whole area. Accordingly, those evaluations led study

participants to want to reconsider the reference scenario. This issue might have been avoided by building confidence with stakeholders earlier in the process (e.g. Therond *et al.*, 2009), illustrating model functioning by giving more details on the relationships between the key processes and variables (Lo-Pelzer *et al.*, 2010a; 2010b) therefore giving more transparency of the system representation in the model (Leenhardt *et al.*, 2012), or by building the reference scenario during a workshop to get it more accurate for stakeholders, this condition being critical for scenarios exercises according to Leenhardt *et al.* (2012). However, the wish to reconsider the reference situation could also be linked with the arrival in the last workshop of new participants (albeit not new stakeholder types or institutions, see Table 3.2), who did not participate in the scenario elaboration and were thus less willing to accept the scenario evaluations (Patel *et al.*, 2007). As highlighted by Peterson *et al.* (2004), unstable participation may indeed be a challenge, threatening consensus reaching, by orienting discussions towards a single interest at the expense of a more systemic view. This was here the case here, e.g. discussions were shifted at the last workshop by new participants from the considered issue to other crop-related problems (e.g. weeds). The reluctance to accept the initial situation, favoured by the iterative approach, may also have been due to its very local peculiarities and uniqueness, thus not taking into account the possible regional environmental heterogeneity, which can influence rural development (e.g. van Berkel *et al.*, 2011) and thus the reference situation (although this was not mentioned by the participants). This system heterogeneity could be linked with the form of knowledge and viewpoints of the different stakeholders involved in the study, e.g. local vs. general (Leenhardt *et al.*, 2012).

Finally, the methodological framework developed in this paper allowed us to build quantitative scenarios to manage an issue that is not currently of prime importance, but which may return with serious economic consequences. Indeed, scenario co-design is usually applied to pressing local problems (e.g. Walz *et al.*, 2007; Molina *et al.*, 2011), which may encourage stakeholders to get involved. Applying it to a case study chosen by researchers meant that the study participants needed to be carefully chosen. We used an iterative process for this (Tompkins *et al.*, 2008), based on interviewing the key stakeholders. These were identified on the basis of their understanding of the challenge and the management possibilities, as was done for climate change impacts by Tompkins *et al.* (2008). The model had to be accepted by the stakeholders, as the method involved the use of a pre-existing model, instead of co-designing or co-adapting the modelling framework (e.g. Therond *et al.*, 2009; Vayssieres *et al.*, 2011). Model acceptance by stakeholders who did not participate in its elaboration can indeed be challenging, leading in some participatory studies to the necessity of co-developing a new model (e.g. Pedersen and Grant, 2004). In our study, model acceptance partly the result of collective discussions about disease processes (model processes) and model outputs in an iterative dialogue, recognized as necessary for both improving information exchanges and building trust with stakeholders (Parker *et al.*, 2002; Leenhardt *et al.*, 2012).

1.5. Conclusion

Scaling up a challenging issue for its regional management can benefit from a participatory approach so that local stakeholders can influence the outcome through their everyday working practices. This method encouraged study participants from the whole sector to get involved in an issue that affects areas much larger than they themselves are concerned with, and on a time scale much greater than a single year or crop rotation. In spite of the complexity and scale of the studied system that could have been overwhelming (Lynam *et al.*, 2007), the proposed method made it possible for stakeholders to build a range of scenarios with highly diverse impacts on phoma stem canker management, whose assessment benefitted from the combined model approach. An interesting result of the application of this method was the diversity of types of scenario (as defined in Borjeson *et al.*, 2006) designed by

stakeholders: predictive forecasting scenarios (e.g. current economic trends), predictive “what-if” scenarios (e.g. regulatory change: banning of a product) and exploratory external scenarios (i.e. policy change), as well as the local or global required changes (e.g. Tompkins *et al.*, 2008). These scenarios led to a diversity of consequences to phoma stem canker management (yield loss, size and genetic structure of pathogen population), underlying for some of them the importance of cropping practice location and combination. Further work is envisaged to understand how these agronomical and spatial factors affect disease management. Finally the proposed and tested method, originally combining the participatory approach involving a diversity of stakeholders, qualitative and quantitative scenario construction and their evaluation with a pre-existing model, highlighted the potential benefits of involving stakeholders in studying the management of such a challenge, especially in a two-way learning process through interaction between researchers and field practitioners. This method proposes a “package” ranging from the identification of a local problem by researchers to the exploration, analysis and discussion with stakeholders of potential future levers for its management. The method could be used for quantitative scenario design for problems whose processes (possibly complex) are strongly influenced by stakeholders seeking a sustainable solution. To improve the implementation of the method for scenario design presented here, we would recommend, for participation improvement and easier model acceptance, to (1) build a partnership with a local key actor, who could locally promote the study and participate to build trust between the local stakeholders and the research team (in case the team is locally unknown) ; (2) give more insight into stakeholders on model functioning and processes instead on only key variables ; (3) facilitate interpretation of scenario assessment, e.g. by structuring and highlighting the relative importance of system input on disease and resistance management, e.g. using linear models (Hossard *et al.*, submitted⁵¹).

1.6. Acknowledgments

Authors would like to thank Marie Boillot (CETIOM) for farmers’ interviews and study participants. Authors would like to thank Alan Scaife for English reviewing. This work was carried out with the financial support of the “CTPS – Comité Technique Permanent de la Sélection – French Permanent Technical Committee for Selection” under the project “Evolep”. This work is part of a Ph.D project funded by INRA, AgroParisTech and ABIÉS. This work is part of the UMT Pivert program supported by the French ministry of Agriculture. Authors thank the SSP (Service de la Statistique et de la Prospective) of the French Ministry of Agriculture for the availability of the dataset “Enquêtes Pratiques Culturelles 2006”. We thank the two anonymous reviewers for their helpful and valuable comments on an earlier draft of the manuscript.

⁵¹ Cet article fait l’objet du Chapitre 4.

2. Application de la démarche à la 2^{ème} région d'étude : la région Picardie

Cette partie présente l'application, en région Picardie, de la méthode de construction des scénarios de systèmes de culture présentée en première partie de ce chapitre (Figure 3.2). Les résultats associés aux principales étapes de la méthode sont illustrés pour cette deuxième région d'étude.

2.1. Identification et enquêtes des principaux acteurs

Trois types d'acteurs, jugés importants localement pour leurs connaissances et leur influence sur la culture du colza, ont été enquêtés : (1) des acteurs du développement et du conseil agricole (deux conseillers de Chambres d'Agriculture et un conseiller d'Agro Transfert Ressources et Territoires) ; (2) un ingénieur du CETIOM local et (3) des acteurs de la collecte et de la distribution (Table 3.5). Deux Organismes de Collecte et de Stockage ont été enquêtés : un négoce et une coopérative, collectant respectivement 9000 et 25000 ha de colza, soit environ 30 000 et 89 000 tonnes de colza respectivement (sources : Noriap, Hubau).

Lors de la deuxième étape, les acteurs enquêtés (Table 3.5) ont identifié l'ensemble des acteurs importants pour la culture du colza et la gestion du phoma. Les acteurs enquêtés ont ainsi identifié les moyens d'action et le degré de concernement des différents acteurs importants vis-à-vis de cette thématique, puis les ont placés sur un schéma localisant les acteurs importants en fonction de ces deux caractéristiques.

Type d'acteur	Etape 2 Enquêtes	Etape 3 Construction schémas	Etape 4 Construction scénarios	Etape 6 ¹ Discussion résultats simulations
Acteurs décisionnels				
Agriculteurs	0	0	0	0/0
Coopératives et négoce	2	3	3	3/2
Sélectionneurs	-	1	1	1/1
CETIOM	1	1	1	1/1
Services de développement	3	3	3	4/3
Décideurs publics	-	1	0	0/1
Autres acteurs				
Chercheurs	-	3	3	3/2
Total	6	12	11	12/10

Table 3.5. Types et nombre d'acteurs ayant participé aux différentes étapes de la méthode de construction de scénarios auxquelles les acteurs sont associés.

Les différentes étapes de la méthode de construction des scénarios sont présentées dans la

Figure 3.1. Seules les étapes ayant impliqué la participation d'acteurs sont présentées dans ce tableau.

¹Les deux chiffres indiqués dans le tableau correspondent aux deux réunions de restitution collectives réalisées en Picardie (voir § 2.5 de ce chapitre)

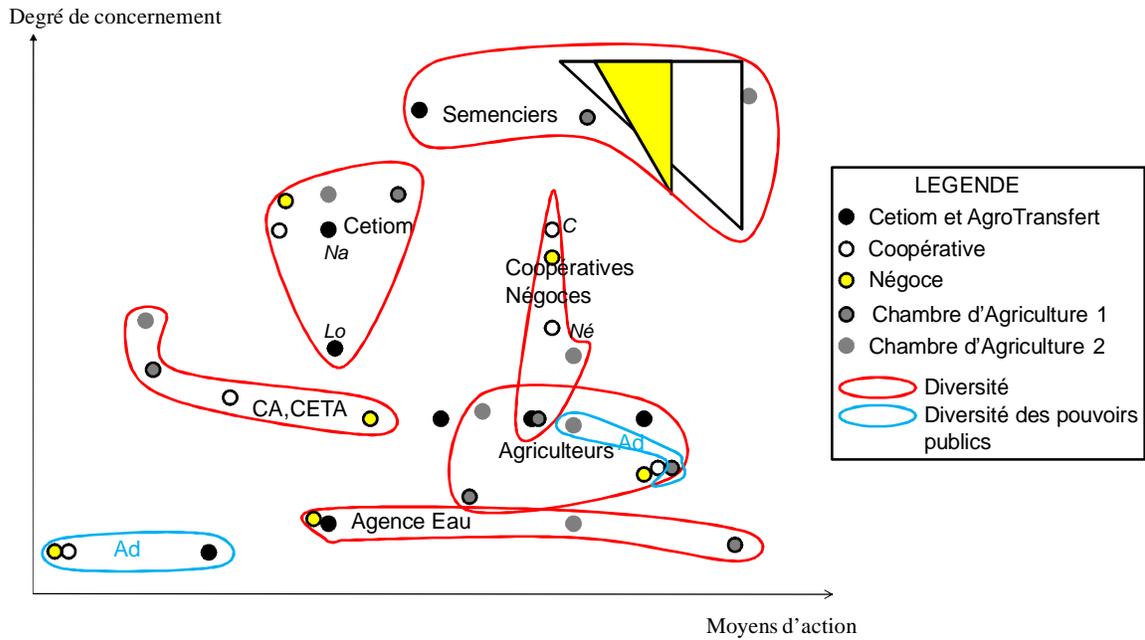


Figure 3.9. Vision des principaux acteurs locaux sur les degrés de concernement et moyens d'action vis-à-vis de la gestion du phoma, par les acteurs de la région Picardie interviewés.

Ad : pouvoirs publics/administratifs (Ministères, voire Europe) ; CA : Chambre d'Agriculture ; CETA : Centre d'Etudes Techniques Agricoles ; Né : négoce ; C : coopérative ; Na : national ; Lo : local.

Les visions des différents acteurs enquêtés sur le degré de concernement et les moyens d'action par rapport au phoma des différents porteurs d'enjeux sont très diverses (Figure 3.9). Les six acteurs enquêtés expriment un point de vue commun sur le positionnement de nombreux acteurs sur le schéma, ainsi que sur les raisons de ce positionnement, pour :

- le faible degré de concernement de l'Agence de l'Eau et des instances administratives et publiques en général, qui sont davantage concernées par des questions environnementales portant sur la qualité de l'eau (ex. gestion des nitrates) ;
- le degré de concernement intermédiaire des structures de conseil agricole (CETA⁵², GEDA⁵³ et CA). Ces structures sont concernées par le phoma du fait de l'impact de la maladie sur les revenus des agriculteurs et de leur rôle direct dans le conseil sur les pratiques auprès des agriculteurs ;
- le fort degré de concernement des semenciers, dont les ventes de semences sont en partie liées à la qualité des variétés, notamment en termes de résistance au phoma. Ce degré de concernement peut varier entre semenciers, selon l'opinion des OS⁵⁴, car il dépend de l'importance stratégique du colza pour le semencier ;
- les moyens d'actions élevés et le faible degré de concernement des agriculteurs. Les moyens de gestion de la maladie sont techniques : choix des cultures, des pratiques et des variétés. Or ces choix sont réalisés par l'agriculteur qui est le « décideur final ». Les agriculteurs de la région Picardie sont peu concernés par ce problème pour deux raisons principales. D'une part le colza n'est pas forcément une culture stratégique pour eux : elle est peu présente dans les rotations, elle n'est pas localement la plus rentable économiquement (par rapport des cultures locales telles que la pomme de terre ou la betterave sucrière par exemple) et elle pourrait être remplacée par une autre culture au sein de la rotation. D'autre part, il n'y a pas eu récemment d'épidémie de phoma importante (pas de pertes de rendement liées à la maladie) ;
- le degré de concernement élevé et les moyens d'actions relativement faibles du CETIOM. Le CETIOM est fortement concerné du fait de sa spécialisation en cultures oléagineuses et de son financement en partie lié à la production quantitative de colza. Ses moyens d'actions sont principalement l'expérimentation et la communication avec les sélectionneurs, les OS et les structures de développement et, dans une moindre mesure, le conseil (ex. site internet). Leurs moyens d'action sont considérés comme relativement faibles du fait de la très faible communication directe envers les agriculteurs : les OS et structures de développement sont les intermédiaires ;
- les moyens d'action relativement élevés des organismes de collecte et de stockage (coopératives et négoce : OS). Ces moyens d'actions concernent principalement la vente de semences (avec un conseil qui oriente le choix de la variété semée), la communication/promotion directe envers les agriculteurs et les expérimentations pour les OS importants (en termes de volume de colza collecté).

Par contre, les visions des acteurs enquêtés divergent sur les moyens d'action et/ou le concernement de certains types d'acteurs (Figure 3.9) :

- sur les moyens d'action des structures de conseil agricole (CETA, GEDA et CA). Leurs moyens d'action sont considérés faibles par ces acteurs eux-mêmes, et intermédiaires par les OS, le CETIOM et Agro Transfert. Ces moyens d'action concernent le conseil technique auprès de groupes d'agriculteurs (préconisations) et la communication, notamment sur les aspects règlementaires ;
- sur les moyens d'action des semenciers. Ils sont considérés intermédiaires par le CETIOM et Agro Transfert et élevés par les autres acteurs enquêtés. Les semenciers ne font pas (ou très peu) de communication directement auprès des agriculteurs. Leur moyen d'action principal est la création

⁵² CETA : Centre d'Etudes Techniques Agricoles

⁵³ GEDA : Groupe d'Etude et de Développement Agricole

⁵⁴ OS : Organismes de collecte et de Stockage

Encadré 3.2. La Directive Nitrates et ses conséquences en termes de gestion des repousses (et résidus) de colza en zones vulnérables

La directive Nitrates (Directive 91/676/CEE du 12 décembre 1991) a été émise par le conseil des communautés européennes pour la protection des eaux contre la pollution par les nitrates d'origine agricole. Cette directive demande aux Etats-membres de l'Union Européenne d'élaborer un code des bonnes pratiques agricoles et d'identifier les zones vulnérables vis-à-vis de la pollution nitrique.

Elle est mise en place, en France, par des Programmes d'Actions, qui définissent les mesures et actions nécessaires à une bonne maîtrise de la fertilisation azotée et à une gestion adaptée des terres agricoles. Leur objectif principal est la préservation de la qualité des eaux superficielles et souterraines par rapport aux nitrates. Ces Programmes d'Actions, jusqu'à présent définis à l'échelle départementale sur la base d'orientations nationales, sont en cours de refonte de manière à garantir leur lisibilité et la cohérence territoriale des actions menées. Le principal changement concerne la définition, à partir de 2012-2013, de mesures obligatoires au titre de la directive au sein d'un unique programme d'actions national (Direction de l'Eau – Mission-SIEau, 2011).

Actuellement, les actions à mener sont définies par le 4^{ème} Programme d'Actions, en cours depuis 2009 et défini à l'échelle départementale. En Picardie, il a été défini pour les trois départements (Aisne, Oise et Somme). Dans les trois départements, le 4^{ème} Programme d'action stipule que le taux de couverture des sols doit être, en 2012, de 100% de la Surface Agricole Utile (SAU) pendant la période à risque de lessivage (source : arrêtés préfectoraux du 30 juin 2009 pour les trois départements). Ces arrêtés stipulent que les repousses de colza doivent impérativement être maintenues pendant au moins trois semaines après la récolte du colza en zones vulnérables. Ceci contraint la gestion des résidus de colza, en particulier l'utilisation des outils de déchaumage, ces techniques ne pouvant donc pas être mises en œuvre juste après la récolte pour gérer les résidus de colza.

variétale. Le CETIOM et Agro Transfert considèrent que l'utilisation des variétés est principalement influencée par le conseil et les choix des OS et des agriculteurs et que donc, relativement, les moyens d'action des semenciers sont plus faibles. Aux dires des OS enquêtés, ces moyens d'action peuvent différer entre semenciers, en fonction de l'importance stratégique du colza et des « avancées et choix génétiques » du semencier ;

- sur les moyens d'action des instances administratives et de l'Agence de l'Eau. Ils sont considérés comme élevés par les CA. Ces moyens sont essentiellement financiers pour l'Agence de l'Eau et réglementaires pour les administratifs. D'après les CA, ces deux leviers pourraient « peser sur les pratiques ». Pour les autres acteurs, ces moyens d'action sont considérés comme faibles : l'aspect réglementaire concerne principalement la gestion des résidus du sol (Encadré 3.2). Ceci contraint la gestion des résidus de colza, dont l'utilisation du labour. Cependant, l'usage du labour est, d'après les acteurs enquêtés, d'ores et déjà peu utilisé en Picardie, en particulier après la culture du colza, ce qui limite le moyen d'action des instances administratives et de l'Agence de l'Eau selon les acteurs enquêtés.

- sur le degré de concernement des OS : il va dépendre du volume relatif du colza par rapport à la collecte globale de l'OS (importance stratégique de la culture). Il est considéré élevé par les OS eux-mêmes, dont le contenu du catalogue variétal prend en compte ce critère. Il est jugé intermédiaire par les autres acteurs du fait de la relativement faible importance régionale de la culture du colza.

Au sein des catégories d'acteurs pré-identifiées, certains acteurs enquêtés réalisent des distinctions. Selon la coopérative enquêtée, il est nécessaire de distinguer les OS selon qu'il s'agit de coopératives ou de négociants. Cet acteur considère en effet les coopératives plus concernées par le phoma et la culture du colza en général, les négociants étant considérés comme des « suiveurs » moins concernés (Figure 3.9). Ainsi, selon cet acteur, les coopératives conseillent techniquement les agriculteurs en plus de leur activité de vente de semences et de collecte, alors que les négociants ont une position principale d'acheteur/collecteur. Cet acteur considère également qu'il est nécessaire de distinguer le CETIOM national du CETIOM local concernant la gestion du phoma et la culture du colza. Cette distinction est due à la moindre importance de la culture du colza en Picardie par rapport à la production française. Concernant les semenciers, leurs degrés de concernement et moyens d'action sont considérés variables par les OS.

Lors de ces enquêtes, les différents acteurs ont souligné la diversité des situations de culture en région Picardie, en lien avec les conditions pédologiques principalement. Les systèmes de culture incluant du colza sont également très divers, avec un délai de retour pouvant varier de 3 à 7 ans d'une zone de production à une autre.

2.2. *Construction d'une vision partagée du fonctionnement du phoma du colza et des acteurs agissant sur la gestion de la maladie et de situations de référence*

De manière à construire une vision partagée du fonctionnement de la maladie et des acteurs dont les choix ou conseils peuvent avoir un effet sur sa gestion, un schéma a été construit collectivement avec les acteurs (Table 3.5), qui identifie les ressources composant ou ayant un impact sur la maladie, les acteurs ayant trait à la gestion de la thématique, ainsi que les dynamiques des ressources et les interactions entre acteurs et entre acteurs et ressources. Les acteurs sont différenciés en acteurs directs et indirects, les premiers étant ceux réalisant (ou contraignant très fortement) les choix techniques et les deuxièmes les acteurs influençant, ou contraignant de manière plus modérée, ces choix. Cette étape se base sur une adaptation de la méthode ARDI (Etienne *et al.*, 2011) (cf. Chapitre 3.1.3.2.4). Pour construire ce schéma, la parole a été donnée à chacun des acteurs présents, à tour de rôle, pour identifier, par exemple, une ressource. Après validation par l'ensemble des acteurs, cette ressource est ajoutée au schéma.

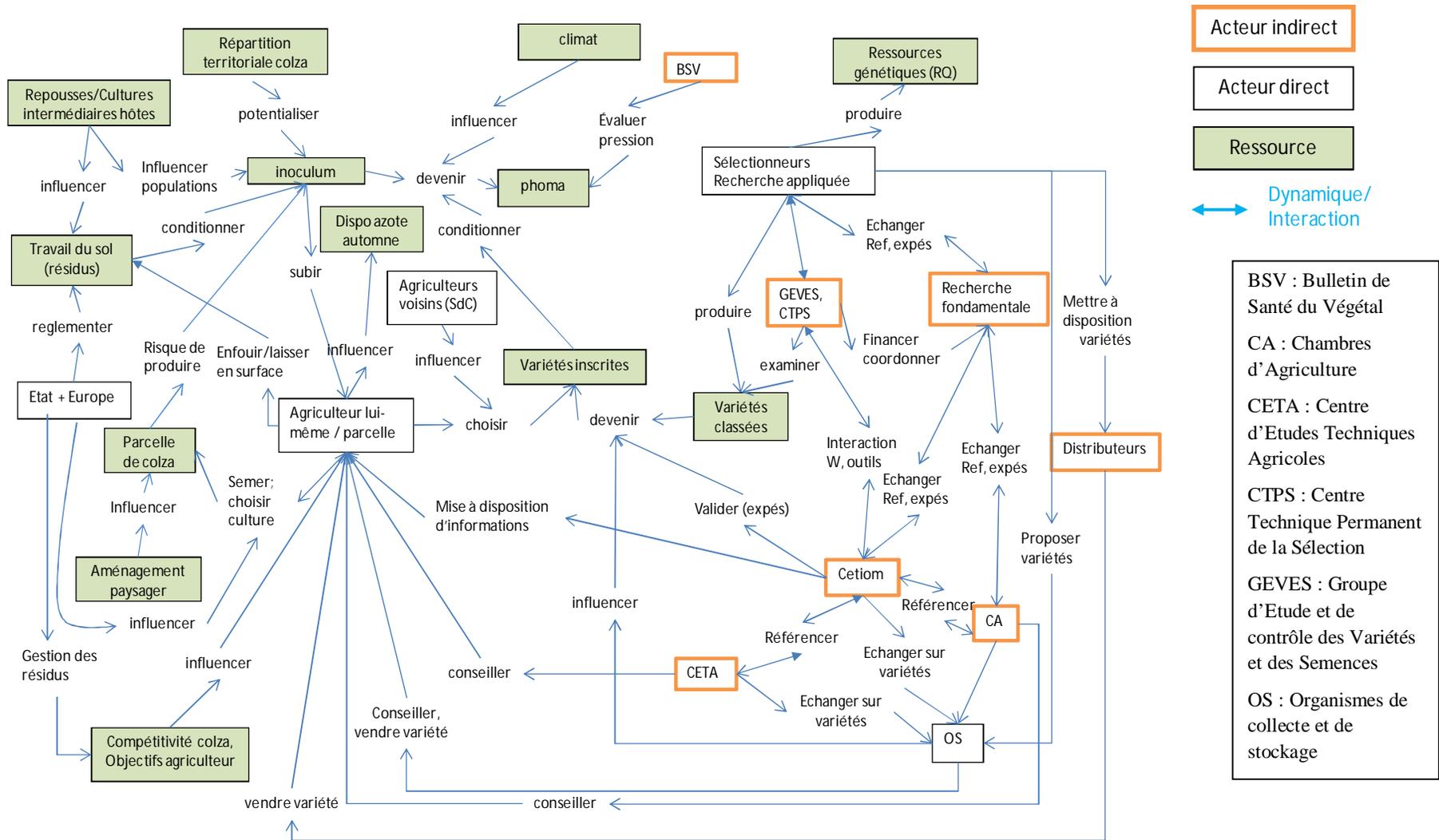


Figure 3.10. Diagramme ARDI (Acteurs, Ressources, Dynamiques, Interactions) réalisé de manière collective en région Picardie. Les flèches bleues représentent une dynamique lorsqu'elles relient deux ressources et une interaction lorsqu'elles relient deux acteurs ou un acteur et une ressource

La même démarche a été appliquée pour identifier les acteurs, et pour caractériser les dynamiques des ressources et les interactions entre acteurs et entre acteurs et ressources.

Les ressources de la culture du colza et de la gestion du phoma identifiées par les acteurs concernent (Figure 3.10):

- les cultures : le colza, les autres cultures ;
- les itinéraires techniques du colza : le travail du sol (gestion des résidus), les variétés ;
- l'échelle supraparcéllaire : l'aménagement paysager, la répartition territoriale du colza ;
- le phoma : le phoma, l'inoculum, les ressources génétiques ;
- les objectifs de l'agriculteur et l'aspect économique de la culture du colza (compétitivité) ;
- les conditions de culture pédologiques (disponibilité azotée automnale) et le climat.

Les dynamiques des ressources sont centrées sur les conditions de développement d'une épidémie de phoma (Figure 3.10).

Les acteurs identifiés par le groupe comme ayant une influence sur la gestion du colza et du phoma sont (Figure 3.10) :

- acteurs directs : l'agriculteur cultivant du colza et ses voisins, les structures administratives (Etat, Europe), les Organismes de collecte et de stockage, les sélectionneurs ;
- acteurs indirects : les distributeurs, le CETIOM, les organismes de conseil (GEDA, CETA, CA) ; les organismes de recherche fondamentale, les organismes participant à la rédaction du Bulletin de Santé du Végétal (BSV⁵⁵), le GEVES (Groupe d'Etude et de contrôle des Variétés et des Semences) et le CTPS (Centre Technique Permanent pour la Sélection).

Les interactions entre les acteurs, hors agriculteurs, concernent principalement l'échange de références et de résultats d'expérimentations. Les semenciers interagissent avec les OS et les distributeurs. L'agriculteur est conseillé par les OS et les organismes de conseil agricole (CA, CETA) (Figure 3.10).

Concernant les relations entre acteurs et les ressources de la culture du colza et de la gestion du phoma identifiées par les acteurs, seuls les agriculteurs, les sélectionneurs et les instances administratives présentent des liens directs avec les ressources (Figure 3.10). Les agriculteurs sont les acteurs qui décident ou influencent le type de culture, le choix variétal, la gestion des résidus et la nutrition azotée du colza. Les sélectionneurs produisent les variétés, et les instances administratives règlementent la gestion des résidus de colza (Encadré 3.2).

2.3. *Construction participative des situations de référence et des scénarios spatialisés de systèmes de culture*

2.3.1. **Construction des situations de référence**

Des données détaillées sur les systèmes de culture n'étant pas disponibles en région Picardie, les conditions actuelles locales de la culture du colza ont été construites de manière collective, après la création des schémas ARDI. Les acteurs présents à cette réunion travaillent dans les trois départements de la Picardie, dont les contextes pédoclimatiques sont différents. De ce fait, trois situations de référence ont été construites par les acteurs, dont les systèmes de culture incluant du colza et les pratiques sur le colza sont cohérents avec les informations récoltées lors de la phase d'enquête. Ces

⁵⁵ Les Bulletins de Santé du Végétal (BSV) sont régionaux et diffusés gratuitement. Ils précisent la situation phytosanitaire pour différentes cultures, sans énoncer de préconisation d'intervention. Ils sont basés sur des informations de surveillance des bioagresseurs, issues de l'ensemble des techniciens de la région (Chambres d'Agricultures, CETA, GEDA, OS, INRA, Semenciers).

situations de références sont synthétisées dans la Table 3.6. Les trois sous-régions Tardenois, Somme et Oise correspondent aux trois contextes culturels principaux du colza. Elles différencient les zones où la culture du colza est très présente, avec des rotations de type Colza-Blé-Orge (sous-région Tardenois), des zones où la betterave et les cultures légumières prédominent. Le délai de retour du colza y est alors de sept ans, dans des rotations incluant du blé, de la betterave, des pommes de terre et des légumes. Le labour n'est utilisé dans aucune des trois sous-régions pour gérer les résidus de colza. Les types de variétés utilisés selon les trois sous-régions diffèrent, avec, pour la Somme, une majorité de variétés avec un niveau de résistance quantitative faible, ce niveau étant élevé dans les deux autres sous-régions. La fertilisation azotée automnale est peu, moyennement ou très utilisée respectivement dans les sous-régions Oise, Tardenois et Somme. Les densités de semis, l'application de fongicide ainsi que les travaux du sol après la récolte du colza diffèrent également entre les trois sous-régions).

Sous-région	Tardenois (T)	Somme (S)	Oise (O)
Fréquence du colza ¹	29%	14%	14%
Dates de semis	20/08-03/09	20/08-05/09	20/08-01/09 (90% des semis)
Fertilisation azotée automnale ¹	40%	60%	20%
Densités moyennes de semis	55 gr.m ⁻²	2/3 à 25 gr.m ⁻² et 1/3 à 45 gr.m ⁻²	25% à 35 gr.m ⁻² 50% à 45 gr.m ⁻² 25% à 55 gr.m ⁻²
Variétés¹			
Avec RlmX	15%	6%	15%
Avec RQ élevé	85%	26%	85%
Avec RQ faible	0%	68%	0%
Gestion des résidus²			
Labour	0%	0%	0%
Herse + cov	0%	100%	0%
2 cov	100%	0%	67%
1 cov	100%	0%	33%
Application de fongicide/régulateur de croissance ²	10%	20%	50%

Table 3.6. Principales caractéristiques des trois situations de références construites avec les acteurs en région Picardie (les pratiques culturelles indiquées sont celles du colza).

¹ : pourcentage des terres cultivables ; ² : pourcentage des surfaces cultivées avec du colza d'hiver ; cov : covercrop ; RQ : résistance quantitative ; gr.m⁻² : grains par mètre carré

Tendance	Sous-région concernée	Changement de contexte	Principale variable impactée	Gamme explorée pour la principale variable impactée	Autres variables modifiées
D. Diminution des surfaces en colza	Tardenois	Problèmes de désherbage, changement règlementaire pour une diminution de l'IFT	Surfaces en colza	10-20% ¹	Dates et densités de semis, variétés, gestion des résidus, climat
E. Changement variétal et réduction de la fertilisation azotée automnale	Tardenois, Oise, Somme	Changement de réglementation (contrainte sur les variétés et/ou sur la fertilisation azotée)	Variétés, fertilisation azotée	Actuelles vs. 0-100% ² de variétés : sensible, avec RQ faible, avec RQ élevé, avec RlmX Fertilisation azotée actuelle vs. 0 azote automnal	Dates de semis, climat
F. Augmentation des TCS	Tardenois, Oise, Somme	Prolongement de la tendance actuelle pour la gestion des résidus :	Travail du sol après récolte du colza	10 ; 20 et 30% ² de TCS	Climat
G. Augmentation des surfaces labourées	Tardenois, Oise, Somme	- (scénarios « tests » pour évaluer l'impact de cette pratique)	Fréquence du labour après récolte du colza	100% ²	Climat
H. Augmentation des surfaces en colza	Somme, Oise	Prolongement de la tendance actuelle pour les surfaces de colza	Surfaces en colza	15 ; 20 ; 25% ¹	Variétés, climat

Table 3.7. Caractéristiques des tendances pour le futur construites en région Picardie (les tendances sont appelées de D à H pour éviter la confusion avec les tendances A à C de la région Centre (Table 3.4)).

RlmX: résistance spécifique actuellement incluse dans certaines variétés cultivées (et non contournée à l'heure actuelle); RQ : niveau de résistance quantitative ; gr.m⁻²: grains par m²; TCS : Techniques Culturelles Simplifiées ; ¹ : en pourcentage de la surface cultivée totale; ² : en pourcentage de la surface cultivée en colza ; climat : voir Annexe C

2.3.2. Construction des scénarios spatialisés de systèmes de culture

Du fait de la diversité des trois situations de référence, certains futurs ont été imaginés pour une seule de ces situations ou pour l'ensemble de la région (Table 3.7). Les tendances pour le futur, imaginées par les acteurs pour l'ensemble de la région, concernent : (i) des contraintes réglementaires ayant des conséquences sur les variétés disponibles et sur la fertilisation azotée automnale (tendance E) ; (ii) un prolongement de la tendance actuelle concernant la simplification des travaux du sol (tendance F) et une tendance « test » pour évaluer l'impact d'un retour du labour sur la gestion du phoma (tendance G). Les futurs dépendant de la situation de référence imaginent deux changements de contexte opposés : une diminution des surfaces de colza, en lien avec des problèmes de désherbage ou une contrainte réglementaire sur l'utilisation de produits phytosanitaires pour la sous-région Tardenois (contraire à la tendance actuelle) (tendance D), vs. une augmentation des surfaces de colza, correspondant à un prolongement de la tendance actuelle pour les sous-régions Oise et Somme (Tendance H) (Table 3.7).

Les acteurs présents à cette réunion collective (Table 3.5) ont associé une gamme de pratiques à ces changements de contexte possibles dans le futur, ainsi que le test d'un « changement climatique » qui, d'après eux, favoriserait les épidémies de phoma du colza (hivers plus fréquemment doux et humides ; c.f. Annexe C). Les variations de pratiques engendrées par ces changements de contexte sont présentées dans la Table 3.8 et totalisent un nombre de scénarios à simuler de 240⁵⁶ pour la sous région Tardenois et de 72⁵⁷ pour chacune des sous-régions Oise et Somme (pour une allocation des systèmes de culture).

⁵⁶ Ces 240 scénarios correspondent à la somme des 192 scénarios de la tendance D, des 40 scénarios de la tendance E, des 6 scénarios de la tendance F et des 2 scénarios de la tendance G.

⁵⁷ Ces 72 scénarios correspondent à la somme des 40 scénarios de la tendance E, des 6 scénarios de la tendance F, des 2 scénarios de la tendance G et des 24 scénarios de la tendance H.

Sous-région	T	T, S and O	T, S and O	T, S and O	S and O
Variable	D. Diminution des surfaces en colza	E. Variétés, fertilisation azotée	F. Augmentation des TCS	G. Augmentation du labour	H. Augmentation des surfaces en colza
Fréquence du colza ¹	10; 20%	ref	ref	ref	15; 20; 25%
Dates de semis	ref; avancées d'une semaine ²	ref; avancées d'une semaine ²	ref	ref	ref
Densités de semis moyennes	ref; 25 gr.m ⁻²	ref	ref	ref	ref
Fertilisation azotée ¹	ref	Ref ; 0	ref	ref	ref
Variétés					
Avec RlmX	ref; 100; 60; 40%	ref; 0; 0; 0; 100%	ref	ref	ref; 0%
RQ élevé	ref; 0; 40; 60%	ref; 0; 0; 100; 0%	ref	ref	ref; 60%
RQ faible	ref; 0; 0; 0%	ref; 0; 100; 0; 0%	ref	ref	ref; 40%
Sensible	ref; 0; 0; 0%	ref; 100%; 0; 0; 0%	ref	ref	ref; 0%
Travail du sol ¹	ref; 50% cov/50% 2 cov; 50% 2 cov/50% 3 cov	ref	10; 20; 30% de TCS	100% de labour	ref
Fongicide ¹	ref	ref	ref	ref	ref; 10%
Climat	Actuel (2003-2008); climat présentant des automnes doux et humides ⁴				
Nombre de scénarios ³	192	40	6	2	24

Table 3.8. Tendances et caractéristiques des scénarios pour la région Picardie (sous régions T : Tardenois ; S : Somme ; O : Oise).

Augmentation/Diminution : par comparaison avec la situation de référence ; IFT : indice de fréquence de traitement ; ref. : valeur dans la situation de référence ; TCS : Techniques culturales simplifiées ; cov : covercrop ; ¹: % des terres cultivées; ²: par comparaison à la valeur dans la situation de référence; ³: pour une répétition et une situation de référence ; ⁴ : Annexe C

2.4. Evaluations des scénarios à l'aide du modèle SIPPOM-WOSR

2.4.1. Réalisation des simulations

Le parcellaire utilisé pour les simulations est localisé à proximité de Beauvais (de 49°25'54.8'' à 49°28'51.2''N et de 02°09'13.0'' à 02°15'13.8''E). Il comporte 158 parcelles et s'étend sur 16.7 km² (Figure 2.11 ;

Figure 3.12). Aucun facteur de localisation des pratiques n'ayant été déterminé pendant l'étape de construction collective des scénarios, trois réalisations aléatoires des systèmes de culture ont été simulées pour chaque scénario (

Figure 3.12). Le nombre total de scénarios à simuler est donc de 720 (240 x 3 répétitions) scénarios pour la sous-région Tardenois et de 216 (72 x 3) pour chacune des sous-régions Somme et Oise.

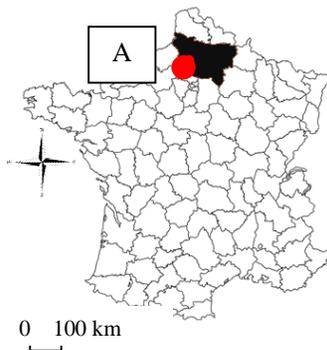


Figure 3.11. Localisation de la région d'étude et du parcellaire agricole support de simulation pour la région Picardie

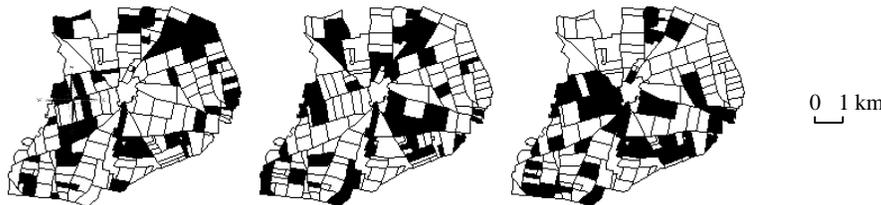


Figure 3.12. Exemple de trois allocations aléatoires du colza sur le territoire agricole pour une année de simulation d'un même scénario.

Les parcelles en noir correspondent aux champs cultivés avec du colza pour une année de simulation.

2.4.2. Résultats des simulations

Les résultats correspondent à la situation finale, après quatre années de simulation (plus une année d'initialisation) du scénario considéré. Les sorties du modèle sont agrégées à l'échelle du parcellaire agricole support de simulation: taille de la population pathogène, pertes de rendement et fréquences d'individus virulents vis-à-vis du gène de résistance étudié (RlmX). Les situations de référence présentent des résultats de simulation contrastés pour les trois indicateurs permettant d'évaluer les conséquences épidémiques et génétiques du phoma du colza. Les sous-régions Tardenois et Oise présentent des pertes de rendement comparables pour leurs situations de référence (environ 10%). Ces pertes de rendement sont plus élevées pour la situation de référence de la sous-région Somme (environ 18%). Les fréquences des individus virulents sur les variétés porteuses du gène de résistance spécifique RlmX sont comparables pour les sous-régions Tardenois et Oise, avec environ 50% d'individus virulents. La sous-région Somme présente un contournement de la résistance plus faible, avec 32% environ d'individus virulents. Les tailles de populations pathogènes de la situation de référence de la sous-région Oise sont plus faibles que celles du Tardenois et de la Somme

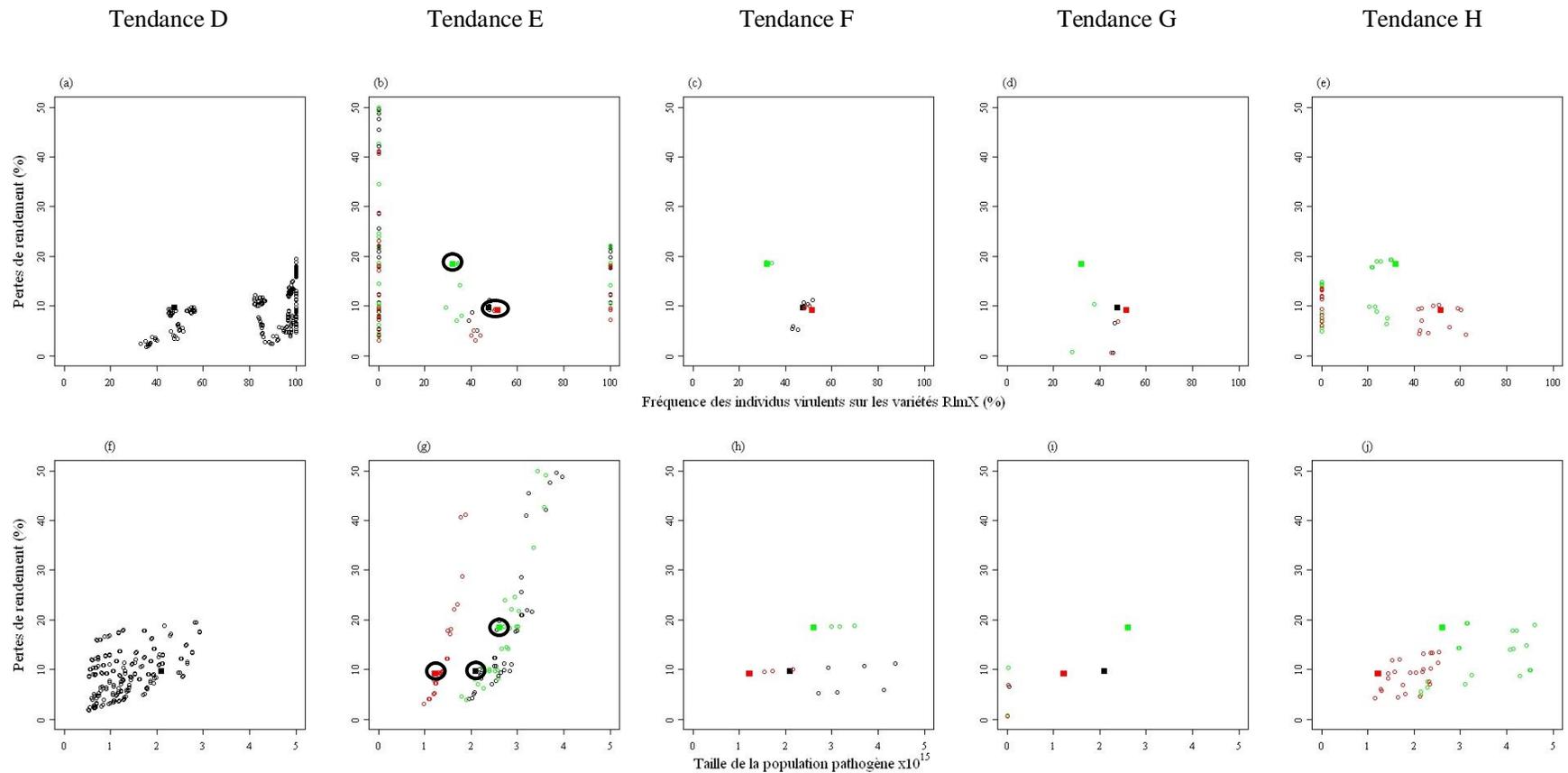


Figure 3.13. Résultats des simulations des scénarios (une seule répétition présentée ici) de la région Picardie.

a, b, c, d, e : pertes de rendement en fonction de la fréquence des individus virulents sur la variété RlmX ; f, g, h, i, j : pertes de rendement en fonction de la taille de la population virulente ; a et f : tendance D ; b et g : tendance E ; c et h : tendance F ; d et i : tendance G ; e et j : tendance H (cf. Table 3.7 et Table 3.8 pour la présentation des tendances). Les points noirs correspondent à la sous-région Tardenois, les points verts à la Somme et les points rouges à l'Oise. Les situations de références sont indiquées par des carrés de la couleur correspondante (entourés en noir dans les figures b et g).

(respectivement 1.22, 2.09 et 2.61 x 10¹⁵ spores) (Figure 3.13). Les différents scénarios simulés pour l'ensemble des tendances des trois sous-régions présentent également des résultats contrastés (Figure 3.13). Pour la tendance E, qui considère une diminution des surfaces en colza, combinée à un changement des variétés cultivées, la majorité des scénarios présente de plus faibles tailles de la population pathogène et pertes de rendement. Ils présentent également une plus forte fréquence des individus virulents sur les variétés porteuses du gène de résistance RlmX par rapport à la situation de référence. Les gammes de variation de la fréquence des individus virulents et de la taille de la population pathogène sont très larges. Concernant la tendance E, considérant un changement variétal et/ou une diminution de la fertilisation azotée automnale, les pertes de rendement et les tailles de population pathogènes sont, d'une manière générale, plus élevées que les situations de référence correspondantes. Les fréquences d'individus virulents sur les variétés RlmX sont plus faibles. Pour la tendance F, qui correspond à une augmentation de l'utilisation des TCS pour la gestion des résidus de colza, les pertes de rendement et fréquences d'individus virulents sur les variétés RlmX sont peu affectées pour les sous-régions Somme et Oise, par comparaison aux situations de référence respectives. Ces deux sorties sont plus variables pour la sous-région Tardenois. Les tailles de population pathogène sont systématiquement plus élevées, par rapport à la situation de référence, pour les trois sous-régions. Pour la tendance H, qui considère une augmentation du labour pour la gestion des résidus de colza, les trois variables présentent des valeurs simulées plus faibles, par comparaison avec la situation de référence de chaque sous-région. Pour la tendance I, qui considère une augmentation des surfaces de colza cultivées, associée à un changement des variétés cultivées, la taille de la population pathogène est systématiquement plus élevée que la situation de référence pour les sous-régions Somme et Oise. Les pertes de rendement sont équivalentes ou plus faibles que la situation de référence considérée. La fréquence d'individus virulents sur les variétés RlmX est systématiquement plus faible que la situation de référence pour la sous-région Somme, et plus variable pour la situation de référence Oise.

L'ensemble des simulations des trois répétitions de chaque scénario construit par les acteurs est présenté dans le Chapitre 3. Les conséquences précises des changements de pratiques définis dans les tendances sont explorées le Chapitre 4 et la première partie du Chapitre 5.

2.5. Discussion collective sur l'évaluation numérique des scénarios co-construits

Dans la région Picardie, deux réunions de restitution des résultats ont été réalisées. La première réunion a été centrée sur les résultats des simulations présentés ci-dessus. Sur le fonctionnement du modèle, les discussions ont principalement tourné autour de la prise en compte de la résistance quantitative dans le modèle et de l'association de résistance génétique de plusieurs gènes de résistance, ainsi que de résistances spécifique et quantitative. Par ailleurs, le niveau de résistance quantitative associé au gène de résistance spécifique RlmX a été questionné. La non-prise en compte des repousses a aussi été soulignée, comme le rôle potentiel d'espèces hôtes autres que le colza pouvant émettre des spores de phoma. Concernant le modèle, un des acteurs a souligné l'intérêt de ce type d'outil, qui permet de « tester des choses non applicables sur le terrain », de voir leurs conséquences en terme de gestion, puis de regarder ensuite « ce qu'il est possible de faire pour l'agriculteur ».

Les acteurs présents à cette réunion ont également émis le souhait d'aller plus loin, vers des indicateurs « seuils » qui permettraient de guider l'agriculteur dans le choix de la parcelle sur laquelle cultiver du colza et le choix de la variété et d'avoir un « conseil territorialisé ». Ces acteurs reconnaissent une difficulté technique à l'utilisation de ces indicateurs, chaque agriculteur ne connaissant pas les variétés cultivées à proximité de ses champs par ses voisins.

Par ailleurs, un changement de contexte concernant les variétés a eu lieu entre la réunion de construction des scénarios et la présentation de leurs simulations par l'équipe de recherche. La

proportion de variétés RlmX (exemple de Rlm7 pris avec les acteurs) a augmenté de manière brutale, jusqu'à 70% des variétés cultivées localement, et ce dans les trois sous-régions. L'impact de ce changement sur la gestion du phoma du colza a été questionné par les acteurs, qui ont suggéré de simuler avec le modèle ce changement du paysage variétal. Finalement, cette réunion a principalement abouti à la construction de nouveaux scénarios par les acteurs présents (Table 3.5), reposant sur la combinaison de « stratégies spatialisées », avec des règles de décision « d'isolement » des parcelles de colza ou de types de variété, éventuellement en combinaison avec un travail du sol particulier⁵⁸. Bien que ce type de stratégie soit reconnu par les acteurs comme « plus difficile à mettre en place », des recommandations en termes de distance d'isolement pourraient être nécessaires pour gérer « ce type de maladie », i.e. comportant une dimension de dispersion à l'échelle pluri-parcellaire.

La deuxième réunion de restitution avait pour objet la présentation des simulations de l'ensemble des scénarios construits dans les deux régions d'étude, y compris les résultats des simulations incluant des règles spatiales pour l'allocation du colza et/ou des variétés, en combinaison avec des travaux du sol spécifiques. Lors de la présentation de ces résultats, la faisabilité technique de mobiliser les principaux leviers de la gestion du phoma du colza a été mise en cause par plusieurs acteurs (OS et organisme de conseil agricole). Par exemple, un allongement fort des rotations, de trois à sept ans par exemple, a semblé « irréaliste » aux acteurs présents à cette réunion. Utiliser le levier « pratiques culturelles », à l'échelle de l'itinéraire technique, a semblé plus raisonnable à ces différents acteurs, en lien également avec le problème posé aux sélectionneurs en cas de diminution des surfaces en colza. Cependant, le levier le plus efficace identifié est le labour, dont l'utilisation dépend du type de sol. Les acteurs ont ainsi souligné que l'« on ne peut pas labourer dans les mauvaises terres », ce qui limite l'utilisation potentielle de ce levier sur certaines parcelles cultivées avec du colza. Un lien est donc souligné entre les surfaces cultivées en colza et la gestion des résidus : une fréquence forte du colza au sein du territoire entraînera sa culture dans les « mauvaises terres » et donc une diminution relative de la fréquence du labour au sein de ce territoire. Le contexte actuel en termes de communication sur la « biodiversité du sol » incite également les agriculteurs à ne plus labourer, ce qui est, d'après les organismes de conseil agricoles présents, contraire à leurs préconisations (alternance du labour/non labour). Les objectifs de l'agriculteur sont à expliciter dans ce contexte : pourquoi utiliser les TCS ? (« doctrine », « gain de temps », « matériel », « carburant »), pour pouvoir réintroduire le labour chez certains agriculteurs. D'après ces acteurs, le levier le plus efficace qui permettrait le retour du labour serait l'interdiction du glyphosate par la réglementation.

Concernant l'organisation spatiale du territoire (i.e. la mise en place de distances d'isolement entre parcelles de colza, ou entre types variétaux), un OS a insisté sur le fait que ce type de stratégie était impossible à mettre en place. L'autre OS présent, moins réticent, a suggéré de demander l'avis des agriculteurs, dont cette organisation dépendra. La faisabilité de ces stratégies collectives dépend pour lui de l'ampleur des gains (non-pertes) potentiels obtenus par la mise en place de ces stratégies, reconnues comme très contraignantes. Pour pallier cette organisation spatialement explicite des variétés, plusieurs acteurs ont proposé d'introduire des « primes à la variété » ou une notion de « qualité » par les OS, de manière à gérer, indirectement, la fréquence d'un type variétal à l'échelle locale. Cela impliquerait par contre, dans certaines zones de Picardie, une collaboration élevée entre les OS, nombreux localement.

⁵⁸ Les résultats de ces scénarios sont présentés dans la deuxième partie du Chapitre 5.

Conclusion du Chapitre 3

- La cohérence entre les hypothèses sur les futurs contextes et leurs implications sur les systèmes de culture entre les deux régions d'étude suggère que les acteurs sont à même d'évaluer les changements de contextes les plus probables.
- Les scénarios construits dans les deux régions d'étude se réfèrent à différents types de changements, impliquant des échelles variées, comme par exemple une échelle nationale pour la réglementation et une échelle locale pour un contexte épidémiologique.
- Les leviers agronomiques mobilisés dans les deux terrains d'étude sont identiques, mais leur gamme de variation varie inter- et intra-région d'étude (cas de la Picardie). Par exemple, la gamme explorée pour les surfaces labourées est plus élevée en région Centre, en lien avec l'utilisation actuelle de cette pratique. Pour les variétés, la gamme plus large explorée dans la région Picardie est liée aux pratiques variétales actuelles.

Retour sur la question de recherche et l'objectif :

La méthode proposée pour construire des scénarios, avec des acteurs, sur une question de chercheurs impliquant le recours à un modèle préexistant, a permis de répondre à l'objectif de construction de scénarios quantitatifs, émis sous hypothèses narratives. Des scénarios globaux, appelés 'tendances', ont été construits par les acteurs. Ces tendances décrivent les contextes futurs de manière narrative. A partir de ces tendances, les acteurs ont ensuite décrit les conséquences de ces futurs sur les systèmes de culture, exprimées de manière narrative et quantitative. Concernant la gestion de la maladie, tous les scénarios construits par les acteurs, dans chaque région, ne permettent pas un contrôle du phoma du colza et des résistances meilleur que les situations de référence locales.

Chapitre 4. Quels déterminants principaux de l'évolution du phoma du colza dans les futurs proposés ?

La construction participative de scénarios spatialisés de systèmes de culture, réalisée dans les deux terrains d'étude, a mis en lumière différents futurs possibles. La gestion du phoma peut être affectée par les modifications des pratiques culturales associées à ces futurs. De manière à analyser, pour chacun de ces futurs, l'impact de la mobilisation de ces différents leviers, des analyses statistiques ont été réalisées de manière à hiérarchiser l'effet de ces leviers en fonction d'un futur particulier. Ce chapitre, qui fait l'objet d'un article soumis à « Agriculture, Ecosystems & Environment » en juillet 2012, présente les résultats de ces analyses.

Encadré 4.1. Matériel et méthodes utilisés pour étudier les principaux déterminants de l'évolution du phoma du colza

Question de recherche : Quels sont, parmi les leviers techniques mobilisés dans les scénarios construits localement par les acteurs, les leviers les plus importants pour la gestion du phoma du colza et des résistances ? Diffèrent-ils selon les futurs imaginés ?

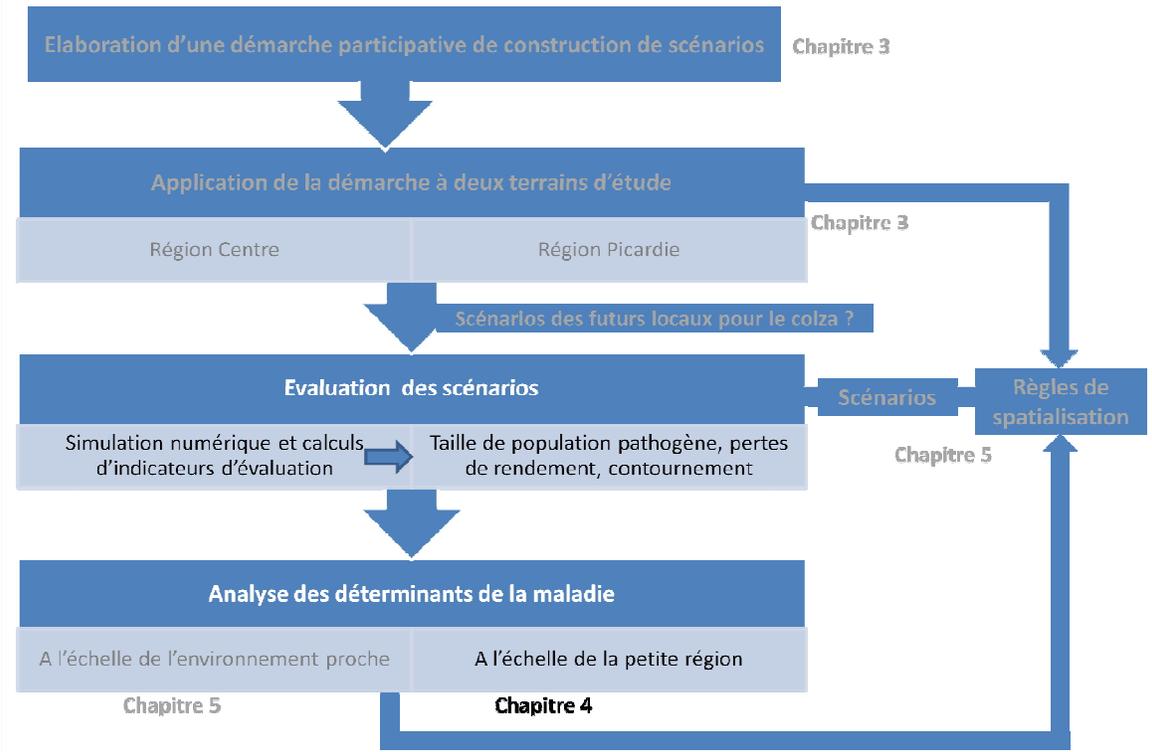
Objectif : Analyser l'influence des différentes pratiques agricoles mobilisées dans les scénarios co-construits sur la gestion du phoma du colza

Terrain d'étude : Centre et Picardie

Echelles temporelle et spatiale : Simulations de 5 ans (dont une année d'initialisation) sur les parcelles agricoles - supports de simulation ; analyses à l'échelle du parcellaire agricole

Variable(s) de caractérisation du phoma : Taille de la population pathogène, fréquence d'individus virulents sur la variété RlmX, pertes de rendement relatives

Analyses statistiques : régressions linéaires réalisées par type de futur (Taille de la population pathogène et pertes de rendement) ou par fréquence de variété RlmX (évolution génétique de la population pathogène)



Cropping system management at a regional scale for the sustainable control of phoma stem canker: a model-based assessment of locally-designed spatial scenarios

L. Hossard^{1,2,3,4,*}, V. Souchere^{3,4}, E. Pelzer^{1,2}, X. Pinochet⁵, M.H. Jeuffroy^{1,2}

¹ INRA, UMR211 Agronomie, F-78850 Thiverval-Grignon, France

² AgroParisTech, UMR211 Agronomie, F-78850 Thiverval-Grignon, France

³ INRA, UMR1048 SADAPT, F-78850 Thiverval-Grignon, France

⁴ AgroParisTech, UMR1048 SADAPT, F-78850 Thiverval-Grignon, France

⁵ Cetiom, BP-04, F-78850 Thiverval-Grignon, France

* Corresponding author: Email lhossard@grignon.inra.fr; Tel +33 1 30 81 59 06; Fax +33 1 30 81 54 25

1. Résumé/Abstract

Résumé

Dans les paysages agricoles, le contrôle des ravageurs et des maladies dépend des caractéristiques et de la localisation des pratiques culturales. Une approche combinant la construction participative de scénarios de systèmes de culture dans une petite région, et leur évaluation numérique avec un modèle spatialement explicite, a été appliqué à deux régions contrastées, différant par leurs systèmes et de culture et leurs conditions pédoclimatiques. Le phoma du colza d'hiver, une maladie responsable à l'échelle mondiale de pertes économiques importantes, a été utilisé comme cas d'étude pour étudier les effets des systèmes de culture à une échelle régionale sur le contrôle de cette maladie et sur la durabilité d'un gène de résistance spécifique introduit récemment (RlmX). Des modèles linéaires ont été utilisées pour estimer les effets des pratiques culturales et des conditions climatiques incluses dans les scénarios sur trois sorties complémentaires du modèle : la taille de la population pathogène, les pertes de rendement et la fréquence de la population virulente sur les variétés porteuses du gène de résistance spécifique RlmX. La taille de la population pathogène est bien expliquée par les surfaces cultivées avec du colza d'hiver, la composition du paysage en termes de variétés et les travaux du sol (gestion des résidus de colza). Les pertes de rendement sont principalement expliquées par les conditions climatiques et les variétés cultivées. La fréquence de la population virulente sur les variétés porteuses du gène de résistance RlmX est partiellement expliquée par la composition du paysage en termes de cultivars, mais les modèles linéaires pour cette variable présentent de faibles valeurs explicatives. Les impacts des pratiques culturales et du climat sur ces trois variables sont cohérents entre les deux régions d'étude, les scénarios explorés étant proche (compte tenu des gammes explorées pour les pratiques et le climat), bien que les facteurs de changement responsable de cette gamme diffèrent entre les régions. La méthode de construction des scénarios est également discutée. Finalement, l'importance des effets d'échelle et des facteurs de localisation est soulignée, ces éléments étant nécessaires pour une gestion durable des résistances, suggérant ainsi l'intérêt d'une coopération entre les acteurs locaux pour un contrôle efficace de la maladie.

Mots-clés : modèle spatialement explicite, phoma du colza, pratiques culturales, durabilité des résistances, modèles linéaires

Abstract

In agricultural landscapes, pest and disease control depend on cropping system characteristics and location. An approach combining the participatory design of cropping system scenarios in a small region, and their numerical assessment with a spatially-explicit model, was applied to two contrasting regions, with regard to their cropping systems and soil and climatic conditions. Phoma stem canker of winter oilseed rape (WOSR), a widespread disease responsible for high economic losses, was used as a case study to investigate the impacts of the cropping systems at a regional scale on its control and on the durability of a newly introduced specific resistance gene (RlmX). Linear models were used to assess the effects of cropping practices and weather conditions included in scenarios on three complementary model outputs: size of the pathogen population, yield losses and frequency of the virulent population on RlmX-cultivars. The first variable was well explained by WOSR acreages, cultivar landscape composition and tillage, and the second by weather conditions and cultivars. The last was explained by cultivar landscape composition, but linear models were of lower explanatory value. Cropping practices and weather impacts on the three variables were consistent between the two regions, as explored scenarios were close (considering their scope for cropping and weather patterns), although drivers for such changes differed between regions. The method of building scenarios is discussed. Finally, scale effects and location factors are highlighted as necessary elements for sustainable resistance management, suggesting the importance of local cooperation between stakeholders for efficient disease control.

Keywords: spatially explicit model, phoma stem canker, winter oilseed rape, cropping practices, resistance sustainability, linear models

2. Introduction

In agricultural landscapes, pest and disease control depends on cropping system characteristics. Disease severity is influenced by management practices modifying the host (i.e. the crop), the pathogen or the environment (Krupinsky *et al.*, 2002). Phoma stem canker (causal agent *Leptosphaeria maculans*) is an internationally important disease of oilseed rape responsible for large economic losses (Fitt *et al.*, 2006). Its management currently mainly relies on the use of resistant cultivars which have quantitative partial resistance, limiting crop damage, and/or qualitative specific resistance. The specific resistance, based on the gene-for-gene interaction (Flor, 1971), stops disease development when the crop carries a resistance gene and the pathogen carries the corresponding avirulence gene (Delourme *et al.*, 2006). However qualitative resistance can be overcome in a few years (Rouxel *et al.*, 2003) and must therefore be managed to increase its duration of effectiveness. Aubertot *et al.* (2006b) showed that resistance preservation and disease control can be improved by (i) managing pathogen population size (quantitative feature) and (ii) limiting the selection pressure on pathogen populations (qualitative feature). These epidemiological components may be influenced by landscape composition in terms of proportion of host crop (Fitt *et al.*, 2006; Skelsey *et al.*, 2010), of cultivars (e.g. on wheat leaf rust epidemics, Papaïx *et al.*, 2011; on virus in Fabre *et al.*, 2012), including resistance gene cropping ratio (Pink and Puddelphat, 1999), and cropping practices (e.g. on phoma stem canker of oilseed rape, Lô-Pelzer *et al.*, 2010a). Landscape configuration also influences resistance sustainability (e.g. Skelsey *et al.*, 2010; Lô-Pelzer *et al.*, 2010a). For phoma stem canker management, design of new strategies of resistance deployment and associated cropping practices scaling up, from annual/field to multi-year/landscape may help disease management (Aubertot *et al.*, 2006b), since the epidemic cycles of this disease are characterized by year-to-year recurrence processes (Hall, 1992) and long-distance dispersal (5-8 km, Bokor *et al.*, 1975).

To determine possible future local landscape composition and configuration in terms of cropping systems, a generic participatory method was designed to produce, evaluate in advance and collectively

discuss scenarios of possible future cropping systems and their location to control phoma stem canker. These scenarios were designed with local stakeholders who may decide or influence cropping system characteristics and/or territorial organization (Hossard *et al.*, submitted⁵⁹). Context-driven scenarios were thus composed of cropping practices potentially affected by such future contexts and potentially influencing management of phoma stem canker and resistance sustainability (Hossard *et al.*, submitted). The efficacy of these scenarios was then assessed for disease control and resistance preservation with the spatially-explicit model SIPPOM-WOSR (Lô-Pelzer *et al.*, 2010a).

The objective of this paper was thus to study *ex ante* the impacts of possible changes in cropping systems and their spatial distribution. Scenarios were designed by local stakeholders facing hypothetical contextual changes, on phoma stem canker control, specific resistance sustainability and agronomic consequences (i.e. yield losses due to the disease). Impacts were assessed with a spatially-explicit numerical model (SIPPOM-WOSR, Lô-Pelzer *et al.*, 2010a). Two regions were considered in which cultivars with a new resistance gene (Rlm-7) have been recently introduced and the gene is still effective. The regions differ in soil and climatic conditions, landscape structure and stakeholder organization.

3. Materials and Methods

3.1. Presentation of the model

SIPPOM-WOSR was presented in detail by Lô-Pelzer *et al.* (2010). Only a short description of model function, main inputs and outputs is presented here.

The model inputs include the field plan of the considered region (field locations and related soil characteristics), the local climatic data (daily rainfall, temperature, wind direction and intensity, wetness duration, evapotranspiration and radiation), the genetic structure of initial pathogen population (i.e. frequency of the considered avirulent genes) and its location (linked with WOSR-field locations in the initialization simulation year), the spatially distributed cropping systems (annual location of WOSR fields and applied cultivation techniques, i.e. sowing time and density, cultivar, autumn nitrogen fertilization, fungicide application, harvest time, tillage operation after WOSR harvest and sowing date of the next crop).

These input variables influence the annual life cycle of the pathogen *Leptosphaeria maculans* and WOSR crop growth through five sub-models: primary inoculum production, pathogen dispersal, pathogen genetic evolution, crop growth and crop infection and yield losses. Model outputs are annual yield losses and pathogen population structures and sizes defined at field scale.

3.2. The two studied areas

Two French regions were considered as case studies: Centre and Picardie (

Figure 4.1). They differ in their WOSR acreage, which occupies 15.7% and 9.6% of the regional arable land respectively (source: Agreste), cultivation techniques (e.g. tillage and cultivars; source: SSP Enquêtes Pratiques Culturelles 2006) and past phoma stem canker epidemics (severe vs. low respectively).

⁵⁹ Cet article correspond à la première partie du Chapitre 3 de la thèse.

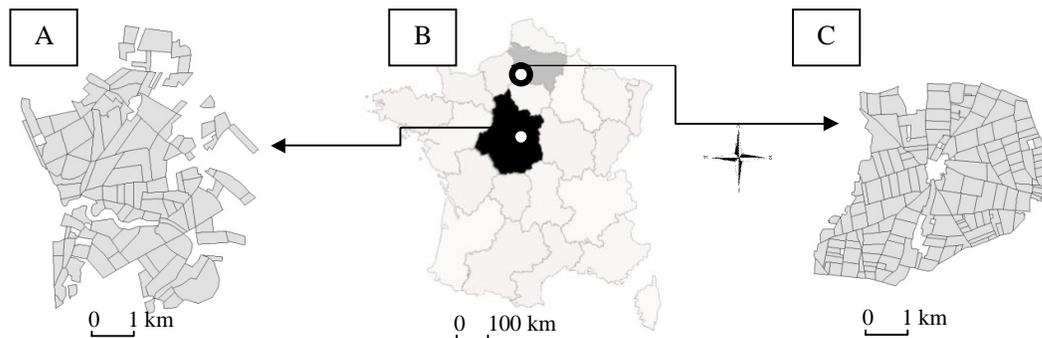


Figure 4.1. Location of (B) the two studied regions (grey: region Picardie; black: region Centre) and simulation support maps, i.e. field plans (A: region Centre; C: region Picardie)

Region	Centre		Picardie	
Sub-region	-	Tardenois (T)	Somme (S)	Oise (O)
WOSR frequency	31%	29%	14%	14%
Cultivar ¹				
RlmX-cultivar	19%	15%	6%	15%
High RQ-cultivar	75%	85%	26%	85%
Low RQ-cultivar	5%	0%	68%	0%
Sensitive cultivar	1%	0%	0%	0%
Residue management ¹				
MB	28%	0%	0%	0%
RT + SB	0%	0%	100%	0%
2 SB	4%	100%	0%	67%
SB	21%	0%	0%	33%
Other	47%	0%	0%	0%
Fungicide application ¹	63%	10%	20%	50%
Nitrogen fertilization ^{1,2}	13%	40%	60%	20%
Initial virulence frequency on RlmX	10^{-7}	10^{-7}	10^{-7}	10^{-7}

Table 4.1. Main characteristics of reference situations for the two studied regions (for the Centre region: adapted from Hossard *et al.*, submitted).

WOSR: Winter Oilseed Rape; RQ: quantitative resistance; MB: mouldboard ploughing; RT: rotary harrowing; SB: stubble breaking; ¹: percentage of the WOSR cropped area; ²: only autumn applications

3.2.1. Locally stable model inputs

One field map was chosen to support simulations for each studied region, close to Civray (112 arable fields, 16.6 km², from 46°56'07.05'' to 46°59'42.4''N and from 02°07'10.3'' to 02°11'26.9''E) for the Centre region and to Beauvais (158 arable fields, 16.7 km², from 49°25'54.8'' to 49°28'51.2''N and from 02°09'13.0'' to 02°15'13.8''E) for the Picardie region (

Figure 4.1). For each zone, weather data provided by Meteo France were used (weather station located at 46°59'30" N 02°10'54" E for the region Centre and at 49°26'42''N 02°07'36''E for the region Picardie).

As the precise soil type of each field was not known, the existing soil types of each region, characterized by soil depth, texture, maximum water storage and clay fraction (Lô-Pelzer *et al.*, 2010a for the Centre region; source: DDT Oise for the Picardie region), were randomly allocated to the fields, in proportion to their prevalence in the region.

Reference situations on cropping systems were designed to appraise the possible benefits of jointly-designed scenarios for phoma stem canker management. For the Centre region, the local reference situation was based on interviews with local farmers about their practices over the period 2003-2008 (Table 4.1). For the Picardie region, reference situations were designed with stakeholders in a workshop, prior to scenario design, as a locally exhaustive cropping system dataset was not available. This led stakeholders to design three different reference situations (hereafter called Tardenois (T), Somme (S) and Oise (O)), linked to the local soil and climate characteristics affecting current cropping systems, as described in Table 4.1.

Context change	Current context, increase in biofuel demand	WOSR net return decrease; Nitrate regulation change (constraining tillage ¹); subsidies for increasing crop rotation duration	Glyphosate banned; RlmX-gene overcome
Main impacted input	A. Increase of WOSR areas	B. Decrease of WOSR areas	C. Increase of MB areas
WOSR frequency ²	33; 42; 50%	26.7; 28.9; 30%	30; 33; 42%
Sowing dates	One week in advance ³	ref	Ref
Mean sowing densities	ref	ref	Ref
Nitrogen fertilisation ²	10%; 22.5%; 35%	10%; 22.5%; 35%	10%; 22.5%; 35%
Cultivars			
RlmX-cultivar	100; 0; 50%	ref	0%
High RQ-cultivar	0; 100; 50%	ref	100%
Low RQ-cultivar	0; 0; 0%	ref	0; 0; 0%
Sensitive cultivar	0; 0; 0%	ref	0; 0; 0%
Tillage ²	0; 10; 20% of MB	ref	30; 40; 50% of MB
Fungicide ² (weather-dependent)	10% for warm wet autumn climate; 0% for current (2003-2008)	10% for warm wet autumn climate; 0% for current (2003-2008)	10% for warm wet autumn climate; 0% for current (2003-2008)
Number of scenarios ⁴	162	18	54

Table 4.2. Trend and scenario characteristics for model inputs for the Centre region (adapted from Hossard *et al.*, submitted).

Increase/decrease: in comparison with reference situation; MB: mouldboard ploughing; ref: reference value; ¹: Nitrate regulation change imagined by stakeholders would delay and reduce time windows for tillage operation after WOSR harvest; ²: % of the annual WOSR area; ³: in comparison with reference situation; ⁴: for one replicate

3.2.2. Scenario characteristics

A four-hour workshop was held in each region for stakeholders to design scenarios as part of a general method ranging from stakeholder identification to collective discussion of scenarios (Hossard *et al.*, submitted). The Rlm7-gene was cited as a case study to stakeholders for scenario design, but the SIPPOM-WOSR model is not gene-specific.

According to the proposed method (Hossard *et al.*, submitted), stakeholders first discussed future trends for WOSR cultivation in their region, and then described future cropping systems involving WOSR, i.e. scenarios, fitting these trends. Their characteristics are presented for the Centre and Picardie regions in Table 4.2 and Table 4.3 respectively. Two climatic options were tested, as suggested by the stakeholders: the current climate and one with greater extremes, such as warm wet autumns.

For scenario design, stakeholders imagined possible futures (hereafter called trends), their driving factors and their implications for WOSR cultivation in their region. For each trend, they described in quantitative terms which WOSR cropping characteristics influencing phoma stem canker and resistance sustainability management (i.e. model inputs) would be affected by such futures, and how (Table 4.2 for the region Centre and Table 4.3 for the region Picardie). For instance, if the RlmX-specific gene is overcome, or glyphosate were to be banned, there would be a need for more intensive residue management. This is indeed a feasible technical solution that could solve the problems arising from either of these two context changes (Table 4.2). Each combination of cropping characteristics and weather patterns (Table 4.2) defined a scenario to be simulated with the SIPPOM-WOSR model. Three repetitions of each scenario were made, varying in the location of WOSR cropping characteristics, as no specific rule concerning crop or practice location was suggested by stakeholders (Figure 4.2). For each WOSR frequency, corresponding crop rotations were applied to fields, e.g. for a WOSR frequency of 50%, each field is cropped with WOSR one year out of two.



Figure 4.2. Example of one year-random WOSR allocation (3 repetitions of the reference situation for the sub-region Tardenois of Picardie region).

WOSR: Winter OilSeed Rape; Black fields correspond to WOSR-crop

Sub-region		T	T, S and O	T, S and O	T, S and O	S and O
Context change		Weeding issues, Policy change for TFI decrease	A single marketed cultivar ; Banning of autumn nitrogen fertilisation	Extension of current practices	Model testing / MB impact	Current context
Main input	impacted	D. Decrease of WOSR areas	E. Cultivars; Nitrogen fertilization	F. Increase No-till on WOSR residues	G. Increase of MB areas	H. Increase of WOSR areas
WOSR frequency ¹		10; 20%	ref	ref	ref	15; 20; 25%
Sowing dates		ref; One week in advance ²	ref; One week in advance ²	ref	ref	ref
Mean densities	sowing	ref; 25 gr.m ⁻² (about half the ref)	ref	ref	ref	ref
Nitrogen fertilisation ¹		Ref	ref	ref	ref	ref
Cultivars						
RlmX-cultivar		ref; 100; 60; 40%	ref; 0; 0; 0; 100%	ref	ref	ref; 0%
High RQ-cultivar		ref; 0; 40; 60%	ref; 0; 0; 100; 0%	ref	ref	ref; 60%
Low RQ-cultivar		ref; 0; 0; 0%	ref; 0; 100; 0; 0%	ref	ref	ref; 40%
Sensitive cultivar		ref; 0; 0; 0%	ref; 100%; 0; 0; 0%	ref	ref	ref; 0%
Tillage ¹		ref; 50% SB/50% 2 SB; 50% 2 SB/50% 3 SB	ref	10; 20; 30% of NT	100% of MB	ref
Fungicide ¹		Ref	ref	ref	ref	ref; 10%
Weather Current (2003-2008); warm and wet autumns climate						
Number of scenarios ³		192	40	6	2	24

Table 4.3. Trend and scenario characteristics for model inputs for the Picardie region.

Increase/decrease: in comparison with reference situation; MB: mouldboard ploughing; NT: No-Till; ref: reference value; TFI: Treatment Frequency Index;

¹: % of the arable area; ²: in comparison with reference situation; ³: for one repetition

3.3. Model-based scenario simulation and statistical analysis

Each scenario was simulated with the SIPPOM-WOSR model (Lô-Pelzer *et al.*, 2010a.) for five years (one year of initialization and four years of simulation *per se*).

Three output variables (i.e. scenario evaluation criteria), considered at the last simulated year, were analysed for scenario appraisal: the frequency of the virulent pathotypes on the studied specific gene (RlmX-gene) introduced into the landscape (i.e. variable avrlmX), the size of the pathogen population (i.e. variable Pop_{size}) and the yield losses (i.e. variable Y_{loss}, expressed relative to the attainable yield for the considered cultivar) due to phoma stem canker epidemics. These outputs were considered for each scenario at the landscape scale: area-weighted values averaged at landscape scale were used for variables avrlmX and Y_{loss} and the area-weighted values sum was used for Pop_{size}, i.e. individual field output was weighted by field size. Scenarios were analysed by trends, as the model input changes suggested by stakeholders represented possible responses to the specific future context change being considered.

When the number of scenarios in a trend was high (≥ 40 scenarios, including repetitions), linear models were run to assess model input impacts per trend, i.e. weather and cropping system variables. If all possible model inputs were to be selected in a trend, the model would be, for the output variable avrlmX :

$$\text{avrlmX}_{\text{trend A}} = \text{constant} + \alpha \cdot \text{Weather} + \beta \cdot \text{WOSR}_{\text{frequency}} + \gamma \cdot \text{Cultivar} + \delta \cdot \text{Tillage} + \varepsilon \cdot \text{N}_{\text{org}} + \theta \cdot \text{Sowing_Date} + \mu \cdot \text{Sowing_Density} + \rho \cdot \text{Fungicide} + \text{error} \quad (\text{Equation 4.1}),$$

where α , β , γ , δ , ε , θ , μ , ρ are the regression parameters.

For qualitative variables (e.g. weather dataset), binary values were used. To assess the level of quantitative resistance, SIPPOM-WOSR initial parameters for this variable were used: a synthetic input variable was calculated taking into account cultivar quantitative resistance levels: 0 for sensitive cultivars, 1 for cultivars with medium quantitative resistance (including RlmX-cultivars) and 2 for cultivars displaying a high level of quantitative resistance. Levels of quantitative resistance were determined by local stakeholders for each cultivar grown.

To check the assumptions for performing a linear model, input independence was checked prior to analysis. When two inputs were correlated ($p < 0.05$), the most explanatory one was kept in the final linear model. After running linear models, the symmetry and the normality of residual distribution for each model were checked to ensure that they had a roughly normal distribution centered on zero, as well as quantile distribution of residues (sample against theoretical) and random distribution against fitted values. For each model, the skewness and kurtosis values were also checked (included in [-1;1] and [-1.5;1.5] respectively) to test distribution symmetry and flattening.

Box-Cox transformations were used for the two output variables yield losses (Y_{loss}) and pathogen population sizes (Pop_{size}) using the R-package “car” (Fox & Weisberg, 2011) of R software (R Development Core Team, 2009). No transformation was used for the output variable fraction of virulent pathogen population on cultivars with the RlmX-gene (avrlmX). For this output variable, linear models were run for each trend and each value of the model input “Proportion of RlmX cultivar”, when scenario simulations produced varying values for avrlmX.

For trends that were not composed of enough scenarios, scenario input effects on the three simulated outputs (avrlmX, Y_{loss} and Pop_{size}) were characterized by their mean input effect values.

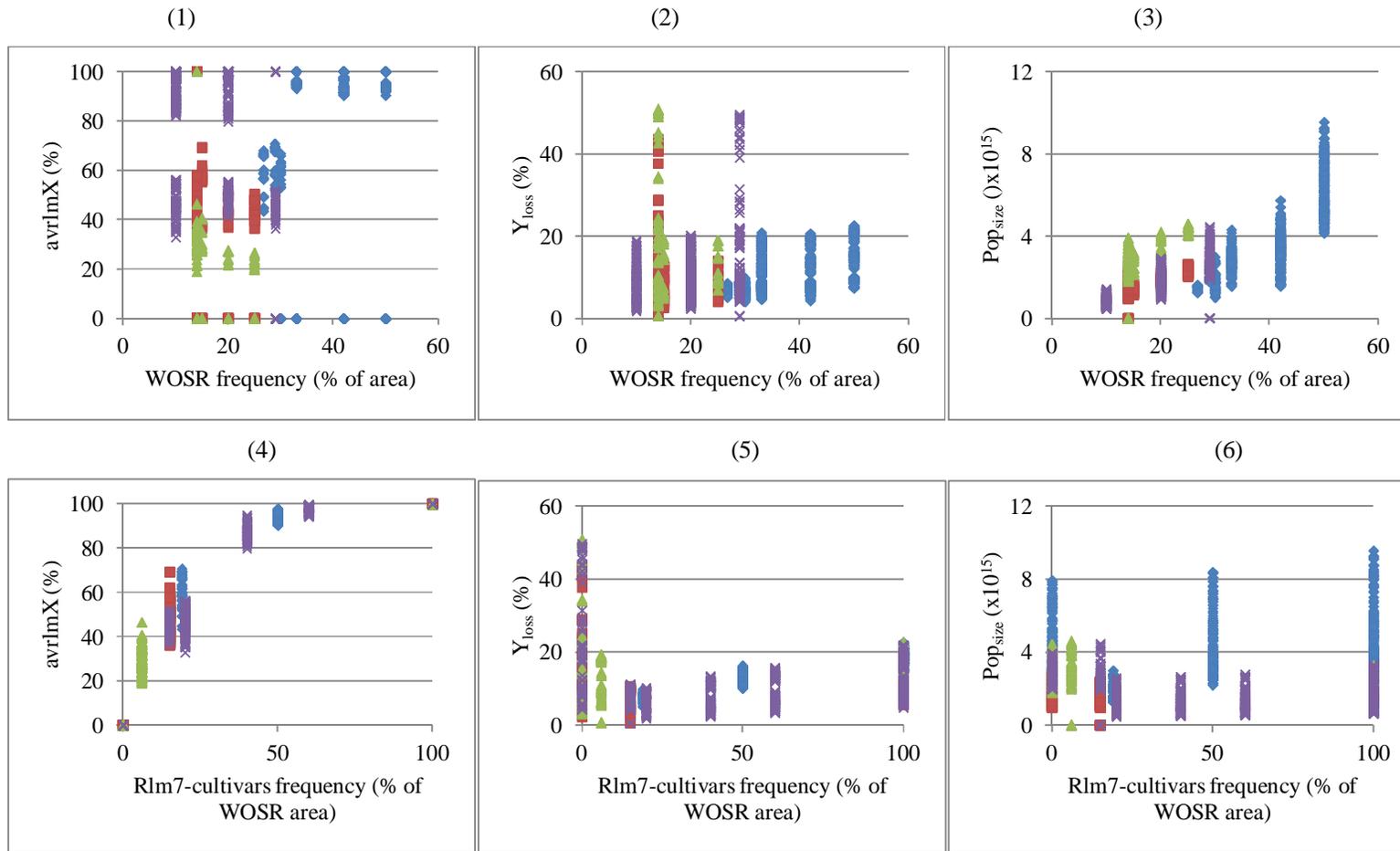


Figure 4.3. Scenario (all trends) simulation outputs ($avrlmX$: 1 and 4; Y_{loss} : 2 and 5; Pop_{size} : 3 and 6) against WOSR frequency (1, 2, 3) and RlmX-cultivars frequency (4, 5, 6)

4. Results

For the two regions, simulated frequency of virulent pathotypes on RlmX-cultivars (variable avrlmX) was mostly affected by the fraction of WOSR cropped with RlmX-cultivars (Figure 4.4), simulations invariably resulting in 100% of virulent pathotypes on RlmX when 100% of WOSR was grown with RlmX-cultivars, and about 0% when no RlmX-cultivars were grown (e.g. for Trend A, c.f. Figure 4.4; Figure 4.3).

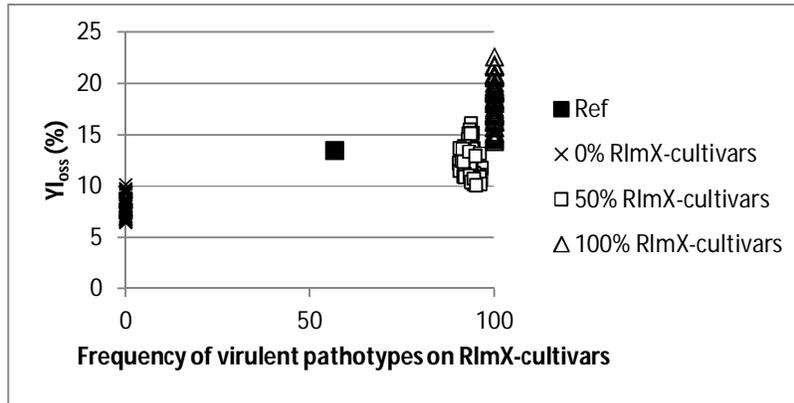


Figure 4.4. Frequency of virulent pathotypes on RlmX-cultivars plotted against yield losses for reference situation and Trend A scenarios (1 repetition). Ref: Reference situation

4.1. The Centre region

4.1.1. Output for the three trends designed by stakeholders in the Centre region

Simulation of the scenarios of the three trends (Table 4.2) designed by stakeholders in the Centre region resulted in highly diverse values for the output variables yield losses (Y_{loss}), size of the pathogen population (Pop_{size}) and frequency of virulent pathotypes on RlmX-cultivars (avrlmX) (Figure 4.5).

An increase of WOSR areas with the other alternative inputs considered (trend A, Table 4.2) never performed better than the reference value while considering the three variable outputs, usually resulting in larger pathogen populations. A slight decrease in WOSR areas with lowering of fungicide use and/or increased autumn nitrogen fertilisation (trend B) always resulted in lower pathogen populations and yield losses but higher frequencies of virulent pathotypes on RlmX-cultivars as compared to the reference situation. An increase in intensive WOSR residue management, e.g. an increase in mouldboard ploughing, even combined with an increase of WOSR areas (trend C), gave better results than the reference situation for the three outputs Y_{loss} , Pop_{size} and avrlmX (Figure 4.5).

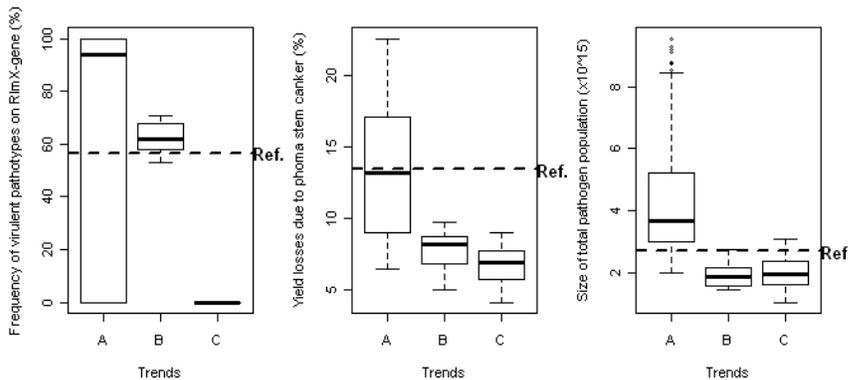


Figure 4.5. Box-plots of scenario simulations for the three output variables (avrlmX, Y_{loss} , Pop_{size}) for the three trends (A, B, C) defined by stakeholders in the region Centre.

(1) avrlmX, (2) Y_{loss} , (3) Pop_{size} . Reference situations for each output variable are represented by horizontal dotted lines.

Scenario input	Pop _{size}						Y _{loss}						avrlmX		
	Trend A		Trend B		Trend C		Trend A		Trend B		Trend C		Trend A.50	Trend B	
	Est.	partial r ²													
Weather	-0.062	0.06		NS	-0.17	0.06	-0.13	0.007	-33.3	0.273	-4.49	0.572	NS	NS	
WOSR (%)	0.015	0.75	0.017	0.784	0.029	0.185	0.019	0.031	10.71	0.213	0.149	0.065	-0.08	0.109	NS
RlmX (%)	0.007	0.05					0.018	0.891					invariant	invariant	
lev_RQ	Correlated ¹						Correlated ¹						invariant	invariant	
Tillage ³	-0.004	0.06			-0.03	0.397	-0.01	0.037			-0.11	0.114	NS		
Nautumn	-9x10 ⁻⁴	0.01		NS		NS	-0.01	0.003	-1.15	0.136	-0.09	0.093	NS	NS	
Fungicide	Correlated ²														
Total r ²	0.93		0.784		0.642		0.969		0.622		0.844		0.109		-

Table 4.4. Effects of cropping system practices (including frequency of WOSR) and weather on the size of pathogen population (Pop_{size}), the yield losses (Y_{loss}) and on the frequency of virulent pathotypes on RlmX-cultivars (avrlmX) for the trends identified by stakeholders in the region Centre: results of linear model (1).

¹: input variable correlated with frequency of RlmX (RlmX(%)); ²: input variable correlated with weather dataset (Weather); ³: in this model, tillage practices were characterized by the frequency of WOSR-residues with mouldboard ploughing after WOSR harvest; grey cell: unchanged input variable within a trend; NS: non significant variable at p=0.05. Only terms significant at alpha=0.05 were kept in the model. Output variable has been Box-Cox transformed. Partial r² was the contribution of a specific variable in the final model composed of all significant input variables. Trend A.50 considers only the scenarios of trend A with 50% of RlmX-cultivars.

4.1.2. Linear model analysis for the three trends of the Centre region

For the three trends explored in the Centre region, linear models gave a high coefficient of determination for pathogen population size and yield loss of all trends (Table 4.4). Linear models for the output variable $avrlmX$ gave lower coefficients of determination (Table 4.4).

For the trend involving an increase of WOSR areas, combined with 0, 50 or 100% of RlmX-cultivars (trend A) and two tested weather patterns (combined with fungicide application characteristics), all input variables determined by stakeholders (proportion of area cropped with WOSR and with RlmX-cultivars, tillage practices and autumn nitrogen fertilisation (Table 4.2) had significant effects on both yield losses and size of phoma pathogen population. For this trend, yield losses were mainly determined by the WOSR areas cropped with RlmX cultivars (about 92% of the coefficient of determination for this linear model) (Table 4.4): decreasing the area of RlmX-cultivars grown decreased yield losses, e.g. decreasing RlmX-cultivar area from 100 to 0% of WOSR areas decreased relative yield losses by 10.3% on average (range 7.9 - 12.4%), with other input variables unchanged. The same results were obtained when using the variable "lev_RQ" (level of quantitative resistance), highly correlated to RlmX-cultivar area (data not shown). Tillage practices (here defined as the proportion of WOSR-residues with mouldboard ploughing) and landscape composition in terms of WOSR-cropped areas were the second most explanatory variables (about 4 and 3% of the linear model coefficient of determination respectively). A decrease in mouldboard-ploughed WOSR residues and an increase of WOSR-cropped area resulted in higher yield losses. Weather (combined with fungicide) and autumn nitrogen application gave lower (although significant) effects; increasing nitrogen fertilisation resulted in smaller yield losses and applying weather conditions thought to be favourable to phoma stem canker epidemics (i.e. with wet, mild autumns) decreased yield losses. Linear model including all significant variables for trend A explained 97% of the total variability of simulated yield losses (Table 4.4).

As for Trend A, trend B linear models for Pop_{size} , i.e. a decrease in WOSR area, combined with changes in autumn nitrogen fertilisation practices, revealed WOSR cropped area to be the main explanatory variable, with a coefficient of determination of 78%. For instance, decreasing WOSR area from 30 to 26.7% of the arable area decreased Pop_{size} by 33% on average (range 23 - 54%), all other input variables being constant. The Trend C main explanatory input for this output variable was the tillage practices (here the fraction of WOSR residues with mouldboard ploughing after harvest), accounting for 62% of the linear model explained variability (e.g. increasing mouldboard ploughing from 30 to 50% of WOSR residues decreased Pop_{size} by 33% on average (range 21 - 43%), all other input variables being constant). WOSR cropped area accounted for 29% of the linear model explained variability, with an increase in pathogen population when increasing WOSR areas. Trends B and C complete linear models accounted for 78 and 64% of pathogen population size variation respectively, i.e. less than for trend A (93%) (Table 4.4).

For the output variable yield losses, the main explanatory input for linear models of trends B and C was the weather, accounting for 44 and 68% of the linear models explained variability respectively, for linear models total determination coefficients of respectively 62 and 84% (Table 4.4). For instance, weather with wet, mild autumns decreased Y_{loss} by 1.3 and 1.8% for trends B and C respectively on average, compared with the current weather. This was significant but the weather was of low explanatory value for trend A, which was mainly explained by the RlmX-cultivar fraction (an input variable not changed for trends B and C (Table 4.2)). Two other input variables that showed a low partial r^2 for trend A showed high explanatory values for trends B and C: these were WOSR cropped area (trend B: 34% of the model explained variability; an increase in WOSR area resulted in increased

yield losses) and Tillage practices (trend C: 14%, intensifying tillage practices decreased yield losses) (Table 4.4).

The output variable “fraction of virulent pathotypes on RlmX-cultivars” was analysed only for trends A and B, i.e. trends for which cultivar configurations resulted in a range of values for avrlmX. For trend A, with 50% of RlmX-cultivars, WOSR cropped area was the only significant variable in the linear model, accounting for 11% of the total variance of avrlmX, e.g. increasing WOSR areas from 33 to 50% decreased avrlmX by 1.4%, with 5 scenarios out of 49 for which the opposite effect occurred. No variable for trend B was significant (Table 4.4).

4.2. The Picardie region

4.2.1. Reference situation simulations for the three sub-regions

Reference situation simulations for the three sub-regions Tardenois (T), Somme (S) and Oise (O) gave different values for the three output variables Y_{loss} , Pop_{size} and avrlmX. S had the largest pathogen population and yield losses combined with fewer RlmX-virulent pathotypes than the other sub-region reference situations. For reference situations of sub-regions T and O, the simulations showed similar yield losses, while Tardenois had fewer RlmX-virulent pathotypes and a larger pathogen population than Oise (Figure 4.6).

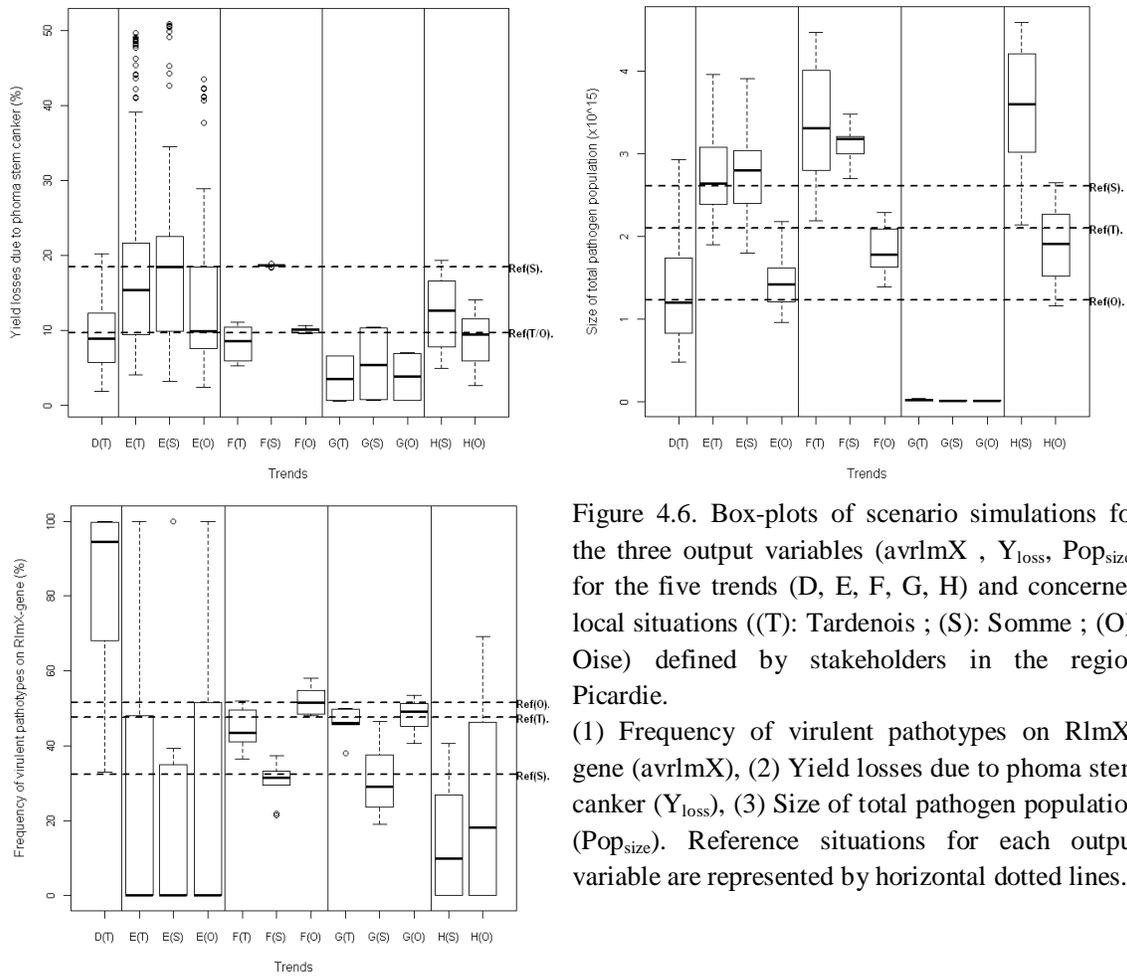


Figure 4.6. Box-plots of scenario simulations for the three output variables (avrlmX , Y_{loss} , Pop_{size}) for the five trends (D, E, F, G, H) and concerned local situations ((T): Tardenois ; (S): Somme ; (O): Oise) defined by stakeholders in the region Picardie.

(1) Frequency of virulent pathotypes on RlmX-gene (avrlmX), (2) Yield losses due to phoma stem canker (Y_{loss}), (3) Size of total pathogen population (Pop_{size}). Reference situations for each output variable are represented by horizontal dotted lines.

Trend	D(T)		E(T)		E(S)		E(O)		H(S)		H(O)	
	Est.	p. r ²	Est.	p. r ²	Est.	p. r ²	Est.	p. r ²	Est.	p. r ²	Est.	p. r ²
Weather	-0.2	0.064	-0.04	0.015	-0.2	0.118	-0.1	0.082	-1	0.097	-0.2	0.042
WOSR (%)	0.07	0.648							0.37	0.82	0.08	0.837
RlmX (%)	0.002	0.027	NS		NS		NS		Corr ¹		Corr ¹	
lev_RQ	Corr ²		-0.2	0.58	-0.32	0.49	-0.2	0.678	-0.9	0.008	-0.6	0.043
Tillage ³	-0.5	0.211										
Sowing date	0.11	0.015	0.03	0.006	0.07	0.014	0.09	0.059				
Sowing density	NS											
Nautumn			-0.005	0.341	-0.004	0.133	-0.002	0.015				
Fungicide									NS		-0.003	0.037
Total r ²	0.965		0.942		0.755		0.834		0.925		0.959	

Table 4.5. Effects of cropping system practices (including frequency of WOSR) and weather on the size of pathogen population (Pop_{size}) for the four trends identified in the Picardie region

Trend	D(T)		E(T)		E(S)		E(O)		H(S)		H(O)	
	Est.	p. r ²	Est.	p. r ²	Est.	p. r ²	Est.	p. r ²	Est.	p. r ²	Est.	p. r ²
Weather	-2.03	0.584	-0.23	0.052	-0.73	0.2	-0.68	0.221	-2.24	0.86	-3.52	0.667
WOSR (%)	0.035	0.017							0.047	0.025	0.089	0.029
RlmX (%)	0.024	0.303	NS		NS		NS		Corr ¹		Corr ¹	
niv_RQ	Corr ²		-0.63	0.833	-1.1	0.646	-0.85	0.702	-1.75	0.061	-7.65	0.197
Tillage ³	-0.56	0.03										
Sowing date	0.205	0.006	0.042	0.002	NS		0.158	0.012				
Sowing density	NS											
Nautumn			-0.01	0.07	-0.01	0.064	-0.01	0.005				
Fungicide									NS		-0.02	0.032
Total r ²	0.94		0.957		0.91		0.94		0.946		0.925	

Table 4.6. Effects of cropping system practices (including frequency of WOSR) and weather on the yield losses (Y_{loss}) for the four trends identified by stakeholders in the Picardie region

Legends for Tables 4.5 and 4.6: Reference situations are in brackets: T, S, O. ¹: input correlated with the level of quantitative resistance (lev_RQ); ²: input correlated with frequency of RlmX (RlmX(%)); ³: tillage practices were here defined as the mean number of stubble breaking operations; grey cells: unchanged input variable within a trend; NS: non-significant variable at p=0.05. Only terms significant at 0.05 were kept in the model. p. r² was the contribution of a specific variable in the final model composed of all significant input variables.

4.2.2. Output for the three trends designed in the Picardie region

Simulation of the scenarios of the five trends (Table 4.3) designed by stakeholders in the Picardie region (eventually corresponding to different sub-regional reference situations, c.f. Table 4.1) resulted, as in the Centre region, in a range of simulated avrlmX, Pop_{size} and Y_{loss} values. For the same trend in Picardie region, simulations gave differing results for the three output variables, depending on the three sub-regions (e.g. trends E and F in Figure 4.6).

No scenario of trends D (sub-region Tardenois), F or H (sub-region Somme) predicted better phoma stem canker management than its reference situation, when assessed from the three output variables Y_{loss}, Pop_{size} and avrlmX conserved together. In no trend did all scenarios result in better phoma stem canker control (Figure 4.6).

4.2.3. Linear model analysis for the four trends of the Picardie region

Linear models for the five trends designed in the Picardie region (with their specific reference situations) displayed high correlation coefficients for the output Pop_{size} (Table 4.5) and Y_{loss} (Table 4.6). Linear models were less explanatory for output avrlmX (Table 4.7).

For the output variable Pop_{size}, WOSR area was the main explanatory variable for every trend (and sub-region) in which this input was a variable (trends D, sub-region Tardenois, and H, sub-regions Somme and Oise). For trend D, describing a decrease in WOSR area in the sub-region Tardenois, this input explained 67% of the model exploratory value, e.g. decreasing WOSR from 20 to 10% of the cropped area halved the pathogen population on average (other inputs remaining constant). For this trend, tillage practices (here defined as the mean number of stubble breaking operations) was an important explanatory variable, with a decrease of 39% in Pop_{size} when increasing the mean number of stubble breaking operations (SB) from 1.5 to 2.5 (i.e. one operation on 50% of WOSR areas and two operations on the remaining WOSR areas vs. two and three operations each on 50% of the WOSR area, Table 4.3). For trend H (considering an increase of WOSR cropped areas for the sub-regions Somme and Oise), WOSR area accounted for 89 and 87% of the complete linear model determination coefficients, e.g. increasing WOSR area from 15 to 25% increased Pop_{size} by 38 and 41% for the sub-regions Somme and Oise respectively. Trends D and H had high linear model determination coefficients for the size of the pathogen population (> 92%) (Table 4.5).

When changing cropped cultivar composition and/or decreasing autumn nitrogen fertilization practices (trend E), Pop_{size} was mainly, for the three sub-regions, affected by the level of quantitative resistance of the cultivars, accounting for 62, 65 and 81% of linear models exploratory value for Tardenois, Somme and Oise respectively. Decreasing the level of quantitative resistance increased the sizes of the pathogen population, e.g. moving from reference situation (lev_RQ=1.85 for Tardenois and Oise and lev_RQ=1.26 for Somme) to sensitive cultivars (lev_RQ=0) increased Pop_{size} by 46, 32 and 51% for Tardenois, Somme and Oise respectively. For the sub-regions Tardenois and Somme, changing autumn fertilization practices was the second explanatory input, responsible for 36 and 18% of the variance, e.g. changing from reference nitrogen fertilization practices to no nitrogen application increased Pop_{size} by 17 and 12% respectively.

For yield losses due to phoma stem canker, trends comparing WOSR cropped areas (trends D and H) were mainly affected by weather, accounting for 62% of total model explanatory value for trend D and 92 and 71% for trend H sub-regions Somme and Oise respectively, i.e. changing from current to wet climatic dataset decreased relative Y_{loss} by 6.7% for trend D(T). For trend E (changing cultivar and fertilization practices), Y_{loss} was mainly affected, like Pop_{size}, by the general level of quantitative resistance, accounting for 87, 71 and 75% of the variance. For instance, moving from the reference situation to sensitive cultivars multiplied Y_{loss} on average by 5 for Tardenois and Oise sub-regions and

Trend	D.15(T)		D.40(T)		D.60(T)	E.15(T)		E.6(S)	E.15(O)		H(S.6)		H(O.15)	
	Est.	p. r ²	Est.	p. r ²	p. r ²	Est.	p. r ²	p. r ²	Est.	p. r ²	Est.	p. r ²	Est.	p. r ²
Scenario input														
Weather	-4.42	0.18	NS	NS		-4.26	0.484	NS	-7.78	0.494	NS		-6.05	0.119
WOSR (%)	0.317	0.093	-0.12	0.034	NS						-0.87	0.515	-1.24	0.336
Tillage ¹	NS		NS	NS										
Sowing date	NS		NS	NS		NS	NS	NS						
Sowing density	NS		NS	NS										
Nautumn						0.05	0.122	NS	NS					
Fungicide											NS		NS	
Total r ²	0.273		0.034		-	0.606		-	0.494		0.515		0.455	

Table 4.7. Effects of cropping system practices (including frequency of WOSR) and weather frequency of virulent pathotypes on RlmX-cultivars (avrImX) for the trends D, E and H.

Corresponding reference situations are indicated in brackets: Tardenois (T); Somme (S) and Oise (O); corresponding RlmX-cultivar frequency are indicated after trend name: results of linear model (1). ¹: tillage practices were here defined as the mean number of stubble breaking operations; grey cells: unchanged input variable within a trend; NS: non-significant variable at p=0.05. Only terms significant at alpha=0.05 were kept in the model. Output variables have been Box-Cox transformed. p. r² was the contribution of a specific variable in the final model composed of all significant input variables.

by 3 for Somme. Linear models of this trend showed high global determination coefficients ($> 91\%$) (Table 4.6).

For the simulated output avrlmX, WOSR area was the most explanatory input for trends involving a change in this input (D and H), except for trend D, describing a decrease of WOSR cropped areas for the sub-region Tardenois. For this trend and considering scenarios with 15% of RlmX-cultivars, linear model presented a low R^2 (27%), 66% of which being explained by patterns. Although weather had a significant effect on avrlmX, reducing it in average by 8% when using wet, mild weather instead of the current climate, this effect was not stable between scenarios, i.e. using the wet mild weather increased avrlmX for 21 scenarios out of 72. For 40% of RlmX-cultivars, WOSR area was the only input to have a significant effect, with a low determination coefficient (3%) for an average increase of 2% of avrlmX with 10% of WOSR when compared to 20% WOSR, this effect being opposite for 31 scenarios out of 72. For 60% of RlmX-cultivars, none of the input was significant for avrlmX (Table 4.7). Increasing WOSR areas from 15 to 25% decreased the frequency of RlmX-virulent pathotypes by 9 and 8% for respectively Somme and Oise sub-regions, with a systematic negative effect.

For the trend exploring cultivar constraint, nitrogen fertilization and sowing time changes (trend E), weather was the most explanatory variable of avrlmX for sub-regions Tardenois and Oise (15% of RlmX-cultivars).

4.2.4. Main input effects for trends mainly due to changes in tillage practices

For scenarios exploring a change from deep tillage practices to mouldboard ploughing of WOSR-residues for all WOSR-cropped fields (Trend G), sizes of pathogen population and relative yield losses were strongly reduced for the three sub-regions of Picardie, while frequencies of virulent pathotypes on RlmX-cultivars were little affected (Figure 4.6).

For the trend exploring a decrease of tillage intensity by introducing No-Till practices on WOSR-residues (trend F), frequencies of RlmX-virulent pathogen and relative yield losses were little affected for the three sub-regions, while sizes of the pathogen population were increased (Figure 4.6). For this trend, the sub-region Tardenois displayed larger variations for the three output variables, as compared to the two other sub-regions.

5. Discussion

5.1. Back to the participatory approach: limitations and advantages

The participatory method for scenario design of future cropping practices used in this study (Hossard *et al.*, submitted) led in both regions to comparable trends regarding both the driving forces (economic, political, regulatory) and the main cropping characteristics to be changed in the scenarios. Although main contextual changes (and driving forces) designed by stakeholders differed between the two regions, impacts on cropping systems were consistent between the Centre region and at least one of the three sub-regions of Picardie. For instance, a decrease in WOSR cropped area was predicted in both regions, but as a response of different context changes (Centre: trend B, Picardie: trend D). In the Centre region, this decrease was brought about by direct economic or political change (i.e. a subsidy for crop rotation diversification) or by indirect political change (limitation of nitrogen fertilizer use), while in Picardie region it was a consequence of increased agronomic constraint (weeding problems) or environmental political change pushing for a decrease in chemical inputs. Trends designed for the two regions (Table 4.2 and Table 4.3) presented different levels of uncertainty, from future predictions to future exploration, i.e. extrapolating “trends and facts from the past and the present” or imagining, under certain hypotheses, “options for future developments” for scenarios highlighting a high level of

causality (van Ittersum *et al.*, 1998), causality being here induced by the mechanistic model used for scenario evaluations (SIPPOM-WOSR, Lô-Pelzer *et al.*, 2010a).

5.1.1. Creating reference situations

In scenario analysis, representing the initial situation (i.e. reference situation, also called baseline scenario) is considered as a key element (Alcamo and Henrichs, 2008, pp. 13-35) describing the current situation (e.g. Palang *et al.*, 2000; Ronfort *et al.*, 2011) or system evolution resulting from present trends (e.g. Claessens *et al.*, 2009). In this study, situation references were built differently in the two regions. In Centre region, initial local cropping systems were based on an exhaustive survey of local farmers' practices (period 2003-2008; data Cetiom- the French technical centre for research and development of oilseed production-) over the time-step of a model simulation; whereas they were jointly designed from local stakeholder expertise in Picardie region, as no detailed local information was available. Indeed, farmers surveys, even in small area as defined for using the numeric framework SIPPOM-WOSR (Lô-Pelzer *et al.*, 2010a), are arduous and very time-consuming (Biarnès *et al.*, 2004) leading to an adaptation of the method. This adaptation may have changed the data for the reference situation. Firstly, construction time was different for the two regions: the reference situation of the Centre region used older data (2003-2008) (although consistent with local expert interviews carried out in 2011 (Hossard *et al.*, submitted)), while in Picardie, reference situations were guided by current practices defined in a workshop in 2011. Secondly, cropping systems in Centre region were mapped according to surveys, those of Picardie being randomly distributed to fields. Thirdly, the reference scenario content may have been affected by the spatial scale used, from very local in Centre to regional in Picardie, with three reference situations referring to different soil and climatic, and thus agronomic, contexts. As workshop participants in Centre region agreed to use only one reference situation, potential regional spatial heterogeneity of environmental factors in this area was not taken into account, although it could influence rural development (e.g. van Berkel *et al.*, 2011). Direct collection of information on future cropping systems was thus preferred in both regions to indirect data collection (such as the use of determining factors, Leenhardt *et al.*, 2010), which in principle might allow locally relevant reference situations to be defined. Factors determining cropping systems can be external (physical environment, farm characteristics, socio-economic and administrative environments) or internal (links/dependencies between different characteristics of the cropping system) (Leenhardt *et al.*, 2010). Although not explicitly used, determining factors of the reference situation in both regions were defined, i.e. local soil/climatic conditions (crop suitability), economic (relative profit of WOSR) and territorial context (e.g. local availability of organic fertilizers; weeding problems).

5.1.2. Visions of the future and consequences in term of model inputs

During the trends and scenario design stage, driving factors defining trends determined cropping characteristics to be modified in the future, highlighting possible internal determining factors for cropping systems (as defined by Leenhardt *et al.*, 2010), e.g. an increase of WOSR areas in Centre region would involve a decrease in tillage intensity because of work organization. Although designed trends were affected by reference situations (e.g. the possible future changes in WOSR areas being driven by the current WOSR acreages in the Picardie region), a difference in the method used for the baseline scenario could not be identified as a determinant for trend design, the two possible changes in WOSR acreages being also explored in the Centre region. The methodological framework used in this study (Hossard *et al.*, submitted) highlighted its potential for producing diverse scenarios, as the two regions could be seen as repetitions of the same participatory approach on two contexts differing in their socio-cultural and biophysical characteristics (Reed, 2008).

When dealing with an environmental issue (e.g. erosion) on a small scale, scenario design is often aimed at finding ways to solve the study object (e.g. Souchère *et al.*, 2010; Stolte *et al.*, 2005). In this study, trends and scenarios were built to design possible futures and their consequences on cropping system variables that may affect phoma stem canker management. This resulted in a diversity of scenarios, most of which performed worse for phoma stem canker management than the reference scenarios. This could be linked with the recent history of this disease, which is largely absent in the two regions, so that it was not a current priority for stakeholders. Indeed, they were not asked to design “solutions” for a problem, but to explore, in a possible future context, what would be their impacts on cropping practices, and to list the possibilities for these practices. It thus highlighted the main cropping change factors affecting phoma stem canker, i.e. what actions could help to control the disease in a specific future context (e.g. what cropping practices to avoid / to promote). Depending on the different future contexts imagined by stakeholders in the two regions, various actions were suggested that could differ between regions for a given trend. This highlighted the validity of the local approach applied in this study (Hossard *et al.*, submitted). Scenarios providing possible solutions to control phoma stem canker, i.e. alternative scenarios, could also have been designed by researchers (e.g. Colbach *et al.*, 2010; Lautenbach *et al.*, 2009; Wechsung *et al.*, 2000) or by simulation (e.g. with sensitivity analyses on weed management to choice of cropping practice in Tricault *et al.*, 2009, or by crop management systems in Bergez *et al.*, 2010). Most certainly, scenarios to be tested would have differed from those presented in this article. More generic, they would have remained theoretical: (1) their in-field local feasibility could not have been assessed, as is possible in a participatory approach, e.g. Anderson *et al.* (1998); (2) drivers of cropping system change could not have been highlighted (i.e. local priorities; Dougill *et al.*, 2006); (3) cost-effectiveness of such changes may have been wrongly estimated as compared to their direct assessment by stakeholders, e.g. Voinov and Bousquet, 2010) and thus of lower usefulness for in-field practitioners. For instance, the feasibility of certain WOSR cultivar patterns in the landscape could be challenged (e.g. trends A, C, D and H, cf. Table 4.2 and Table 4.3), without regulatory control of seed types (trend E). It would thus involve coordination between stakeholders (at least breeders and cooperatives/retailers) for this to happen, and such coordination can be facilitated by a participatory approach aiming at reaching a common objective (e.g. Souchère *et al.*, 2009).

5.2. *Effects of modifying cropping practices on phoma stem canker control, resistance sustainability and yield losses*

5.2.1. **Resistance sustainability and disease risk definitions**

Three variables were chosen to assess scenarios for sustainable phoma stem canker management: two epidemiologic characteristics (pathogen population size, fraction of virulent pathotypes on a specific resistance RImX) and one agro-economic, i.e. the yield losses due to the disease. Often, sustainability of resistant cultivars is assessed by focusing on the evolution of the frequency of virulent pathotypes on a specific gene within the pathogen population, i.e. the time between its introduction and the time when it reaches a given threshold (e.g. Brun *et al.*, 2010). However, farmers are more interested in the effect of the disease on yield (Savary *et al.*, 2006) than epidemiological mechanisms, so we chose to study this. Finally, for disease risk evaluation, the size of the pathogen population was also studied to reflect the disease pressure (Lô-Pelzer *et al.*, 2008) and regional density of inoculum (Plantegenest *et al.*, 2007; Aubertot *et al.*, 2006b), together with complete information on frequency of virulent pathotypes on a gene (Brun *et al.*, 2010). Population size could indeed balance the frequency of virulent pathotypes, e.g. a high population with a low RImX-pathotype frequency could mean higher RImX pathogens than a low population with high RImX-pathotype frequency. It also allowed us to assess scenarios without RImX-cultivars with an epidemiologic indicator (e.g. trends C, D and H, cf.

Table 4.2 and Table 4.3). As the three assessment criteria often performed differently for disease management, design of a synthetic criterion could help for local epidemic risk analysis, e.g. the size of a virulent pathogen population towards RlmX (i.e. $\text{Pop}_{\text{size}} * \text{avrImX}$), although this would only work where RlmX-cultivars are grown.

5.2.2. Differences in ranking of cropping controls between the three scenario assessment criteria

The frequency of RlmX-virulent pathotypes was mostly explained by the fraction of the landscape cultivated with cultivars with this specific gene (Figure 4.4). Through the increase of one type of resistant cultivar, selection pressure on the pathogen population was thus increased and resistance sustainability decreased, in accordance with studies based on pathogen population surveys (e.g. Rouxel *et al.*, 2003), model-based studies (van den Bosch and Gilligan, 2003; Fabre *et al.*, 2012) and statistical modelling analyses (e.g. Papaïx *et al.*, 2011). When studying other cropping effects assuming a stable composition of cultivars in the landscape (i.e. a constant fraction of RlmX-cultivars), explanatory variables for this assessment criterion were the climate choice and the WOSR acreage (inversely proportional to crop succession length), which had low explanatory power in most cases. Additional explanatory variables may be necessary to increase this power, particularly the location of cultivars and tillage practices (trend F (1) in Figure 4.6) within the landscape throughout the simulation, i.e. characterizing the environment in detail (Krupinsky *et al.*, 2002) for RlmX-cultivars in terms of cropping practices, including cultivars (e.g. the cultivars on which intensive tillage practices are applied). Moreover, results showed unstable effects of changing the acreages of WOSR on the frequency of virulent pathotypes on RlmX-cultivars, which may seem counterintuitive, i.e. one might expect that increasing WOSR acreages at a stable fraction of RlmX-cultivars would decrease the mean distance between emitting and receiving fields of RlmX-virulent spores, thus lowering resistance sustainability. But increasing WOSR areas whilst maintaining a constant fraction of RlmX (<50%) will, proportionally, reduce the distance more between RlmX-receiving fields and non-RlmX emitting fields than the distance between RlmX-receiving fields and RlmX emitting fields. Moreover, comparing results between trends and regions showed that the effect of the WOSR fraction was less stable when lowering the fraction of RlmX-cultivars in the landscape. It could be explained in terms of probability: the higher the fraction of the WOSR with RlmX-cultivars, the higher the probability for a target (receiving) field to be adjacent to a compatible emitting field. These results suggest that detailed characterization of a scenario map and cultivar locations would be necessary to design strategies for sustainable use of newly released sustainable cultivars, to assess the effects of landscape structure on pathogen dispersal and evolution (Plantegenest *et al.*, 2007), especially between compatible emitting-receiving fields. Additional variables for scenario analyses could include the areas, orientations and distances between emitting and receiving fields (e.g. Colbach *et al.*, 2005). Characterizing the local diversity and the possible aggregation (e.g. Viaud *et al.*, 2008) in terms of cultivar composition could improve scenario assessment with regards to resistance sustainability.

Conversely, the assessment criterion for the size of the pathogen population of phoma stem canker was well explained by cropping practices, mainly by the WOSR acreages, the cultivars and tillage practices. As expected, an increase in WOSR acreages increased the size of the population (Fitt *et al.*, 2006), while increasing tillage intensity (Schneider *et al.*, 2006) and increasing proportion of cultivars with a high level of quantitative resistance decreased the size of the pathogen population, which is in accordance with the fact that quantitative resistance decreases internal stem canker severity (Huang *et al.*, 2009), itself being responsible for a decrease in the primary inoculum production (Lô-Pelzer *et al.*, 2009).

Relative yield losses were also well explained by linear models of cropping practice characteristics and weather. They were mostly explained by weather conditions and landscape cultivar composition. In the SIPPOM-WOSR model (Lô-Pelzer *et al.*, 2010a) yield losses are linked with cultivar type, thus explaining the impact of this input variable. Using a climatic dataset likely to present favourable conditions for phoma stem canker development surprisingly decreased yield losses in all trends. This could also be linked with the model behaviour: with the temperature being higher, WOSR plants would grow faster, reaching the 6-leaf stage earlier in the season (the time at which plants becomes highly resistant to primary inoculum, whatever the cultivar; Brunin and Lacoste, 1970). Thus the time for pathogen dispersal to be successful in infecting plants would be reduced. In a context of global warming, such an effect could be useful. It would be necessary to study in detail differences between the climatic datasets, in order to highlight the effect of temperature, but also of wind characteristics (e.g. Viaud *et al.*, 2008). Weather has also been found to modify disease incidence in other pathosystems (e.g. on potato late blight, Skelsey *et al.*, 2010; on grapevine moth and powdery mildew, Caffarra *et al.*, 2012). In this study, stakeholders decided to test weather condition change for all future. Climate change was thus not, in that sense, the driver for practice changes, as might have been expected (e.g. Rounsewell *et al.*, 2005).

Other practices included in the model and modified by stakeholders had smaller effects (but sometimes significant) on the three assessment criteria: increased autumn nitrogen fertilization significantly decreased yield losses in both population sizes in Picardie. These results differ from those of other studies (e.g. Aubertot *et al.*, 2004a) but are consistent with the stakeholders' hypothesis and the fact that, according to Krupinsky *et al.* (2002), adequate soil fertility would "reduce plant stress, improve physiological resistance and decrease disease risk". This could be explained by the model assumptions whereby extra nitrogen accelerates leaf fall, resulting in lower biomass at the beginning of the winter, which is part of the equation for calculation of disease index, yield losses and primary inoculum production (Lô-Pelzer *et al.*, 2010a). Fungicide application and sowing density changes had almost no effect on the three assessment criteria. Early sowing decreased yield losses and pathogen population sizes by increasing the asynchrony between the periods of pathogen release and plant susceptibility, in agreement with Aubertot *et al.* (2004a).

In summary, the main variable affected by future context changes was not always the one having the biggest effect on the three assessment criteria. Moreover, since the most influential variables differ for the three assessment criteria, their importance for stakeholders will also differ: whilst a breeder might be more concerned with the evolution of the pathogen population's resistance, farmers could be more focused on yield losses.

5.3. Scale effects and location factors

The scenarios tested were ranked on a local scale for the three assessment criteria, i.e. up-scaling from individual field results to a small-region result. Thus we took into account landscape effects on disease management, which is necessary when pathogens may be dispersed widely (Plantegenest *et al.*, 2007). This allowed us to think on the scale at which processes are taking place and are represented in the model (van Delden *et al.*, 2011). However, it may not be the scale at which local control strategies could apply, that would normally be the farm scale (e.g. for soil-borne disease, Gilligan *et al.*, 2007). When dealing with local cropping systems, this level is of prime importance, the farm being the organizational level interacting with biophysical, social and economic systems (Volk, 2011). It is the level at which farmers' decisions and adaptations to change are made (Gibbons and Ramsden, 2008). Moreover, it is the scale that farmers and some extension services best understand; thus it would have been interesting to use it in the scenario approach (Mahmoud *et al.*, 2009). Use of this scale would make it possible to add economics to the studied outputs, thus focusing on the whole cropping system

instead of only WOSR. Economic impacts of new management practices could therefore be estimated on the farm scale (e.g. Stolte *et al.*, 2005). This would require assumptions about market prices, as well as the design, with stakeholders, of more detailed cropping system characteristics, which was not feasible in this study.

During scenario design, no location factors were suggested by stakeholders, apart from soil types in Centre region (Hossard *et al.*, submitted), which is a classical determinant (Clavel *et al.*, 2011). Thus repetitions for each scenario were realized to take into account spatial distributions of cropping practices and cultivars. For instance, scenarios included the fraction of the arable area cultivated with WOSR, which could lead to different allocations to fields (Dury *et al.*, 2011), i.e. crop arrangements (Castellazzi *et al.*, 2010). Using a farm scale approach could also have helped, e.g. by determining crop acreages per farm (Clavel *et al.*, 2011). However, this would have required pre-determining farm field distribution within the studied landscape, and thus would not have altered the results, particularly on the variability of sustainability of the RlmX-gene.

6. Conclusion

This study provides insight into cropping system effects on a current disease epidemic. Application of linear models to model simulations of collaboratively-built scenarios revealed the need to consider different assessment criteria for phoma stem canker management. These criteria were not determined by the same cropping practices and/or weather patterns, and may each correspond to a factor to manage (yield loss for farmers and cooperatives/retailers; resistance sustainability for plant breeders). Highlighting the most efficient cropping practices (e.g. WOSR return delay; cultivar) to be applied in the event of different future changes could help local decision-makers how to respond, at least for two of the three assessment criteria. For the third criterion, location factors may be of prime importance, as allocating cropping practices at random to fields (a stochastic approach) indicated large variation towards gene resistance efficacy duration. Such local landscape effects may be further explained by neighbourhood effects, highlighting the need of a local management and a local coordination of WOSR acreages, cultivar location and associated cropping practices, especially in areas with a high disease pressure.

7. Acknowledgments

The authors would like to thank Marie Boillot (Cetiom) for farmers' interviews, as well as workshop participants of the regions Centre and Picardie. Authors would like to thank Alan Scaife for reviewing the English. This work was carried out with the financial support of the "CTPS – Comité Technique Permanent de la Sélection – French Permanent Technical Committee for Selection" under the project "Evolep". It is part of a Ph.D project funded by INRA, AgroParisTech and ABIES. This work is part of the UMT Pivert program supported by the French ministry of Agriculture. Authors thank the SSP (Service de la Statistique et de la Prospective) of the French Ministry of Agriculture for the availability of the dataset "Enquêtes Pratiques Culturelles 2006".

Conclusion du Chapitre 4

- La hiérarchie et le poids des variables agronomiques diffèrent selon le contexte imaginé et les choix réalisés pour les autres variables mobilisées.
- La hiérarchie et le poids des variables agronomiques diffèrent selon la variable d'évaluation des scénarios considérée (épidémiologique, génétique ou agronomique). L'évaluation de la durabilité des résistances et de la gestion du phoma doit donc être plurielle, et se baser sur plusieurs indicateurs complémentaires.
- L'analyse à l'échelle du territoire agricole permet, pour la majorité des futurs imaginés dans les deux terrains, d'explicitier les déterminants de la taille de la population pathogène et des pertes de rendement dues au phoma.
- Concernant l'évolution de la structure génétique de la population pathogène, l'analyse à l'échelle du territoire agricole met en lumière uniquement la composition variétale du paysage comme facteur explicatif. Des analyses à une échelle spatiale plus fine apparaissent nécessaires pour évaluer l'effet des autres leviers sur le contournement de la résistance introduite dans le paysage. Ces analyses sont présentées dans la première partie du Chapitre 4.

Retour sur la question de recherche et l'objectif :

Les leviers techniques les plus importants concernent la rotation (fréquence du colza), le choix variétal et les travaux du sol sur la gestion des résidus de colza. L'impact de ces différents leviers dépend de la gamme explorée dans les futurs imaginés par les acteurs.

Chapitre 5. Effet de la spatialisation des systèmes de culture : influence des caractéristiques du paysage local et effet de règles de décision

L'analyse à l'échelle du parcellaire agricole a permis de mettre en lumière l'effet des systèmes de culture et pratiques agricoles, définies dans les scénarios construits par les acteurs, pour deux caractéristiques de la gestion du phoma du colza : la taille de la population pathogène et les pertes de rendement. La prise en compte de cette échelle ne permet cependant pas d'explicitier l'impact des systèmes de culture sur l'évolution de la structure génétique de la population pathogène vers l'acquisition de la virulence envers le gène de résistance spécifique considéré. La première partie de ce chapitre explore donc l'influence des caractéristiques du paysage local (quelques centaines de mètres) sur l'évolution de la structure génétique de la population pathogène pour les scénarios co-construits, à partir de plusieurs métriques paysagères considérant les types variétaux et/ou les pratiques agricoles. Cette première partie correspond à un projet d'article. La deuxième partie de ce chapitre explore l'effet de la mise en place de règles de décision d'allocation des parcelles, spatiales (isolement) et temporelle (maximisation des surfaces un an sur deux), sur la gestion du phoma du colza et des résistances, ces règles de décision ayant été suggérées par les acteurs ayant participé à la conception des scénarios de la région Picardie.

Encadré 5.1. Matériel et méthodes utilisés pour le Chapitre 5

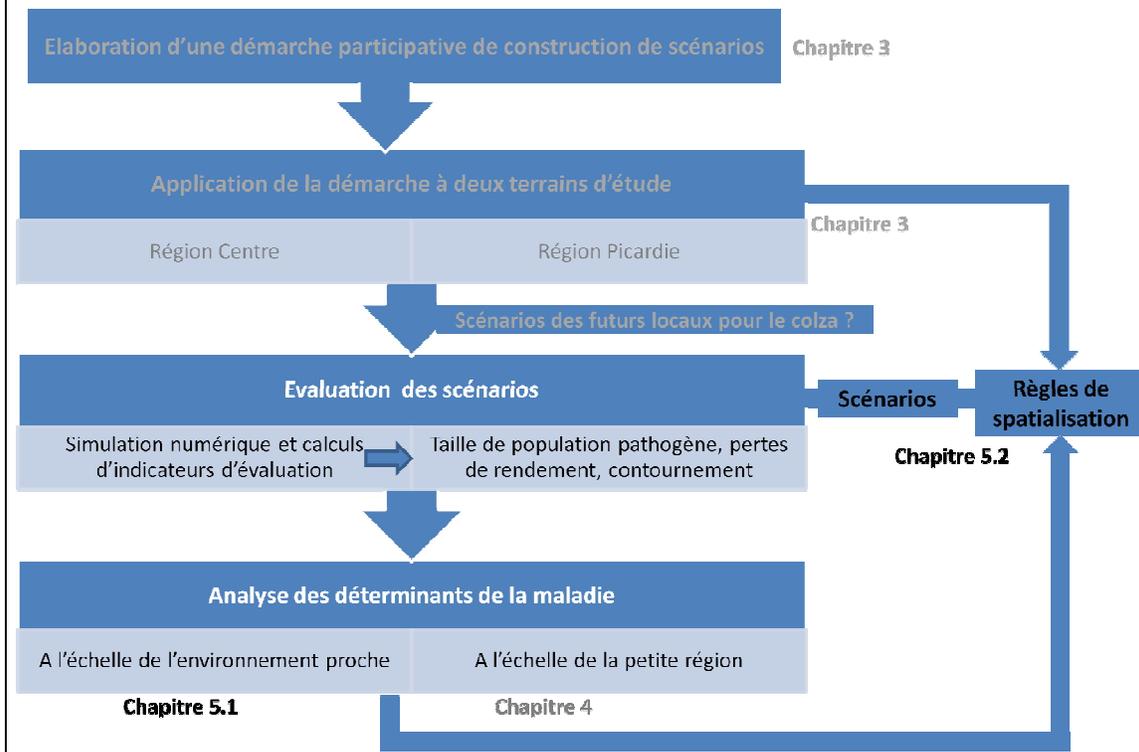
Question de recherche : Quelles échelles et règles spatiales (d'isolement) et/ou temporelles d'organisation des systèmes de culture, sont pertinentes pour une meilleure gestion du phoma et des résistances ?

Objectif : Etudier l'effet de la spatialisation sur la gestion du phoma et des résistances en (1) analysant les systèmes de culture précédemment construits à une échelle spatiale fine, et (2) en explorant des règles spatiales d'isolement du colza ou d'un type variétal

Terrains d'étude : Centre et Picardie (1^{ère} partie du chapitre) ; Picardie (2^{ème} partie du chapitre)

Echelles temporelle et spatiale : simulations de 5 ans (dont une année d'initialisation) sur le parcellaire agricole - support de simulation

Variable(s) de caractérisation du phoma : Fréquence d'individus virulents sur la variété RlmX (parties 1 et 2), taille de la population pathogène, pertes de rendement relatives (partie 2 uniquement)



1. Etude de l'impact de la localisation des systèmes de culture sur l'augmentation de la durabilité des résistances au phoma chez le colza

Evidence of cropping systems localization for the increase of resistance sustainability. A model-based study on phoma stem canker of winter oilseed rape.

L. Hossard^{1,2,3,4,*}, M. Gosme^{1,2}, V. Souchere^{3,4}, M.H. Jeuffroy^{1,2}

¹ INRA, UMR211 Agronomie, F-78850 Thiverval-Grignon, France

² AgroParisTech, UMR211 Agronomie, F-78850 Thiverval-Grignon, France

³ INRA, UMR1048 SADAPT, F-78850 Thiverval-Grignon, France

⁴ AgroParisTech, UMR1048 SADAPT, F-78850 Thiverval-Grignon, France

⁵ Cetiom, BP-04, F-78850 Thiverval-Grignon, France

* Corresponding author: Email lhossard@grignon.inra.fr; Tel +33 1 30 81 59 06; Fax +33 1 30 81 54 25

1.1. Résumé/Abstract

Résumé

La simplification des systèmes de culture a rendu les agrosystèmes plus sensibles aux ravageurs et aux maladies. Les fongicides mis à part, la gestion actuelle des maladies des cultures repose principalement sur l'utilisation de variétés résistantes, dont la durée d'efficacité peut être faible. La gestion des résistances pour un contrôle durable des maladies est donc nécessaire. En utilisant un modèle spatialement explicite, nous avons évalué des systèmes de culture, construits précédemment par des groupes d'acteurs impliqués dans le choix des pratiques agricoles, permettant de gérer le phoma du colza. Nous avons évalué l'adaptation des populations pathogènes à un gène de résistance RlmX introduit récemment dans les paysages agricoles. Les évaluations des systèmes de culture ont été réalisées en analysant les effets des choix variétaux et des pratiques agricoles liées, dans des zones circulaires autour des parcelles cultivées avec des variétés porteuses du gène de résistance RlmX. Nous avons défini des indicateurs locaux, pour des zones de 100 à 2000 mètres, en prenant en compte les pratiques sur les parcelles cultivées avec des variétés porteuses du gène de résistance RlmX ou avec des variétés non porteuses de ce gène. Trois types d'indicateurs ont été utilisés pour caractériser les pratiques agricoles dans les zones considérées : (1) des indicateurs de surface (proportion de parcelles sources de spores), (2) des indicateurs de densité (proportion de parcelles sources pondérée par les surfaces des parcelles sources), et (3) des indicateurs dépendants de la distance entre les parcelles sources et les parcelles cibles. En utilisant ces indicateurs, nous avons montré que l'effet des pratiques agricoles sur la durabilité des résistances est significatif à l'échelle locale. Cet effet est significatif également pour des zones de petites tailles (moins de 500 mètres autour des parcelles cultivées avec des variétés porteuses du gène de résistance RlmX). La pratique la plus influente est le choix variétal, bien que certaines autres pratiques agricoles soient dans certains cas plus explicatives de la durabilité des résistances. Nous discutons le potentiel de ces résultats pour la gestion de la maladie via l'isolement des variétés. Nous concluons que les pratiques agricoles doivent être caractérisées à l'échelle du paysage agricole et à l'échelle locale, en prenant en compte le type de

variété auxquelles ces pratiques sont associées, pour promouvoir une utilisation durable des variétés résistantes.

Mots-clés : Durabilité des résistances, variété, pratiques agricoles, modèle spatialement explicite, modèle linéaire, phoma du colza, métriques paysagères, analyse multi-échelle

Abstract

Simplification of cropping systems has led to agro-systems being more sensitive to pests and diseases. Apart from fungicides, current disease management mainly relies on cultivar resistance, whose efficacy can be short. Therefore, resistance management for durable disease control is required. Using a spatially-explicit model, we evaluated cropping systems management that had been previously designed by groups of stakeholders involved in field agronomic practices to manage phoma stem canker of winter oilseed rape. We evaluated pathogen population adaptation to an RlmX resistance gene newly introduced in several landscapes. These evaluations of cropping systems consisted of analyzing the effects of winter oilseed rape cultivar choice and related crop management in circular buffers surrounding fields where target RlmX-cultivars are cropped. We defined local indicators, for buffers between 100 and 2000 meters, taking into account practices on either RlmX-cultivated source fields or non-RlmX source fields. These indicators characterized cropping practices within the buffer as: surface-based indicators (proportion of source fields); density-based indicators (proportion of source fields divided by target field areas) ; and distance-based indicators (accounting for source-to-target distances). Indicators describing local cultivar composition were very informative. Their effect on specific resistance sustainability could be shown for many buffers, even when considering only the cultivar choice in the first 500 meters surrounding RlmX-fields. Other cropping practices were of higher informative value landscapes composed of homogeneous cropping practices. We discussed the potential of our results towards cultivar isolation for disease management. We concluded that cropping practices have to be characterized at both landscape and local scale, taking into account the type of cultivar they are applied on, to promote resistance sustainability.

Mots-clés : Resistance sustainability; cultivar; cropping practices; spatially-explicit model; linear model; phoma stem canker; landscape metrics; multi-scale analysis

1.2. Introduction

At the global scale, agricultural production has doubled between the 1960's and today (Godfray *et al.*, 2010). This production increase was permitted by, or accompanied by, an expansion of agricultural lands, cropping systems simplification, the use of highly productive cultivars and an intensive use of chemical inputs (Stoate *et al.*, 2001). These modifications have led to the simplification and standardization of agricultural landscapes structures (Stoate *et al.*, 2001). Landscape simplification in terms of cultivated crops resulted in agrosystems being more sensitive to pests and diseases (Meehan *et al.*, 2011). The increase of genetic uniformity of agricultural landscapes thus promotes disease epidemics, favoring pathogen spread and evolution across landscape (Stukenbrock and McDonald, 2008).

To control pathogens, the genetic control method is highly efficient on the short term and therefore widely used. However, specific resistance genes can be quickly overcome through the adaptation of the pathogen population, which is favored by the intensive use of a single resistance gene within cultivars cropped in the landscape (Rouxel *et al.*, 2003). The sustainability of specific resistance genes, i.e. the increase of gene efficacy duration, can be promoted by cropping practices such as tillage for pathogens whose inoculum resides in the soil at some point in their life cycle (Schneider *et al.*, 2006) and, for pathogens displaying large-scale dispersal, optimized cultivar allocation at the landscape scale (Lô-Pelzer *et al.*, 2010 ; Skelsey *et al.*, 2005; 2010). Therefore, strategies of resistance gene deployment as well as optimized cropping systems have to be defined at the multi-year and landscape scales for efficient and sustainable disease control (Aubertot *et al.*, 2006b). To assess a strategy's efficiency towards these two objectives, spatially-explicit modeling is very useful, since such scales are difficult to address experimentally (Hijmans and van Ittersum, 1996).

Phoma stem canker of Winter Oilseed Rape (WOSR), caused by *Leptosphaeria maculans*, is a typical pathosystem for which landscape characteristics, in terms of cultivars and cropping practices, impact disease spread (Aubertot *et al.*, 2006b). Today, its management relies mainly on the use of resistant cultivars (Delourme *et al.*, 2006), especially cultivars with specific resistance (i.e. gene for gene interaction; Flor, 1971), which are named RlmX (X is the number of the gene, currently resistance Rlm1-7 are known). Moreover, *Leptosphaeria maculans* ascospores are wind-dispersed to long distance (Bokor *et al.*, 1975) and the life cycle contains year-to-year recurrence processes (Hall, 1992), therefore spatio-temporal patterns of crops and cultural practices have a strong influence on the disease and pathogen evolution. The spatially-explicit model SIPPOM-WOSR has been designed to assess landscape-scale strategies for phoma stem canker control and improvement of specific resistance sustainability (Lô-Pelzer *et al.*, 2010a).

Possible scenarios for future cropping systems have been designed in two French WOSR-cultivation regions in collaboration with stakeholders (Hossard *et al.*, submitted, a). Their effects have then been assessed on phoma stem canker severity and pathogen evolution at the whole landscape scale (Hossard *et al.*, submitted, b). These evaluations highlighted the difficulty of assessing specific resistance sustainability from cropping systems characteristics defined only at the scale of the whole landscape (Hossard *et al.*, submitted, b). Sustainability of specific resistance being a major issue, it is important to better understand the determinants of this sustainability. Considering cropping characteristics at a short spatial scale instead of the whole landscape may help such assessment because the same landscape composition in terms of cropping systems can lead to different crop and cropping practices spatial allocations, i.e. agricultural landscape configurations (Dury *et al.*, 2012). For issues where distances actually matter, considering cropping characteristics at a more local scale can be useful to assess control strategies, for instance using the proportion of land receiving a given cropping practice within a limited radius or the distance between the focus field and the nearest landscape element of a



Figure 5.1. Location of (B) the two studied regions (grey: region Picardie; black: region Centre) and simulation support maps, i.e. field plans (A: region Picardie; C: region Centre) presenting one year-random WOSR allocation (3 repetitions) for the regions (A) Picardie and (B) Centre, with 29% of the areas cropped with WOSR. Black fields correspond to WOSR-crop.

given type (Colbach *et al.*, 2009b ; Rusch *et al.*, 2011; Viaud *et al.*, 2008). For phoma stem canker of WOSR, Marcroft *et al.* (2004) reported the gradually decreasing influence of the distance between source field and target field on disease severity, from 0 to 1000m. Downscaling cropping system characterization from the landscape scale (Hossard *et al.*, submitted, b) to the local scale may thus help understanding resistance sustainability for this pathosystem. In particular, looking closely into the cropping systems (including cultivars) applied in the neighborhood of fields cropped with a specific resistance X (RlmX) (where only resistant pathotypes can develop) might explain the genetic evolution of pathogen population, which remained unpredictable at a larger scale. Such understanding may greatly help disease management and resistance sustainability increase.

However, the identification of the most influential cropping practices may depend on the cultivar they are applied on. Indeed, complex interactions can occur between cropping practices and cultivars (Aubertot *et al.*, 2006b), with effects on disease and resistance management differing according to the types of cultivar specific cropping practices are applied on (Lô-Pelzer *et al.*, 2010a). The most influential practices might depend on the size of the considered area around RlmX-fields, and on the type of indicators used for such characterization (e.g. indicators based on the areas of the source fields or on the distances between source and target fields). The objective of this paper was thus to analyze the effects of cropping system characteristics in the neighborhood of RlmX-fields on the sustainability of specific resistance used to control phoma stem canker. This was done through the identification of (1) the most influential cropping practices (among cultivar choice, soil tillage, pesticide use...); (2) the most relevant indicators for their characterization (area based, distance based) ; (3) the spatial scales at which they influence pathogen population genetic evolution (from 100 to 2000 m). The study was conducted in two different French agricultural landscapes, for cropping systems previously designed (Hossard *et al.*, submitted, a, b⁶⁰).

1.3. Material and Methods

1.3.1. Presentation of the model

We used the spatially-explicit model SIPPOM-WOSR to simulate the effects of cropping systems composition and localization on resistance sustainability of cultivars displaying specific resistance towards phoma stem canker. This model was presented in detail in Lô-Pelzer *et al.* (2010). The main model inputs are the field map, climatic data, initial genetic structure of the pathogen population and its location, and the spatially distributed cropping systems, providing details on location of WOSR fields and on cultivation techniques. These inputs determine the annual life cycle of *Leptosphaeria maculans*, their effects being displayed in the five sub-models of SIPPOM-WOSR (ascospores' production, ascospores' dispersion, genetic evolution of the pathogen population, WOSR growth, WOSR infection by *L. maculans* and subsequent yield losses). Output variables comprise both agronomic and epidemic aspects (annual yield losses, evolution of pathogen genetic structure and population size). Outputs are available at the field and at the landscape scales.

1.3.2. Presentation of the studied areas

The study was conducted in two different areas located in the regions Centre and Picardie in France (Figure 5.1). Currently these two regions are characterized by various cropping systems, differing especially in terms of the acreage of WOSR (resp. 16% and 9.6% of arable land; source: Agreste), and crop management (e.g. tillage practices and cultivars; source: SSP Enquêtes Pratiques Culturelles 2006). Because of very different agricultural contexts linked with soil specificities, three sub-regions have been defined in the region Picardie (Tardenois (T), Oise (O) and Somme (S)), which correspond

⁶⁰ Ces deux articles correspondent à la première partie du Chapitre 3 et au Chapitre 4.

name	region	WOSR frequency (%) ^a	Nitrogen fertilization ^b	Cultivars ^c	Tillage ^d	Fungicide ^e	Mean sowing time	Mean sowing density ^f	Number of scenarios ^g
A.50	Centre	33 ; 42 ; 50	10 ; 22.5 ; 35	50/50/0	0 ; 10 ; 20% MB	Weather-dependent	25.08	52	54
B.19	Centre	26.7 ; 28.9 ; 30	10 ; 22.5 ; 35	19/81/0	28% MB	Weather-dependent	30.08	52	18
D.15_T	Picardie	10 ; 20	40	15/85/0	2SB ; 1SB/2SB ; 2SB/3SB	10	27.08 ; 20.08	55 ; 25	48
D.40_T	Picardie	10 ; 20	40	40/60/0	2SB ; 1SB/2SB ; 2SB/3SB	10	27.08 ; 20.08	55 ; 25	48
D.60_T	Picardie	10 ; 20	40	60/40/0	2 SB ; 1SB/2SB ; 2SB/3SB	10	27.08 ; 20.08	55 ; 25	48
E.15_T	Picardie	29	40 ; 0	15/85/0	2SB	10	27.08 ; 20.08	55	8
E.15_O	Picardie	14	20 ; 0	15/85/0	67% 2SB / 33% 1SB	50	26.08 ; 20.08	45	8
E.6_S	Picardie	14	60 ; 0	6/26/68	RT+SB	20	28.08 ; 20.08	32	8
H.15_O	Picardie	15 ; 20 ; 25	20	15/85/0	67% 2SB / 33% 1SB	50 ; 10	26.08	45	12
H.6_S	Picardie	15 ; 20 ; 25	60	6/26/68	RT+SB	20 ; 10	20.08	32	12

Table 5.1. Characteristics of the cropping systems scenarios, defined at the scale of the whole landscape. Scenarios were devised by stakeholders according to the expected impact of changes in the agricultural context (trends A to H), different hypotheses concerning the use of resistant cultivars (the numeral in the row names indicates the percentage of RlmX cultivars) and, in some cases, the type of soil (letters S, T or O in the row names). Several figures in one cell indicate that several scenarios were tested.

^a: percentage of oilseed rape in the cropped area; ^b: percentage of the WOSR area receiving autumnal organic nitrogen fertilization; ^c: frequency of cultivars RlmX/ nRlmX with a high level of quantitative resistance/ nRlmX with a low level of quantitative resistance ; ^d: percentage of the WOSR area receiving different tillage practices, MB: Moldboard ploughing; SB: Stubble breaking; RT: Rotary harrowing ; ^e: percentage of the WOSR area treated with fungicides, "weather-dependent" means that no application was done for the current weather and on 10% of WOSR for the extreme climate; ^f: s.m⁻²: seeds per square meter ; ^g: number of scenarios tested, including the two tested climatic datasets; each scenario was simulated three time with different random spatial allocation of crops and cropping practices in fields.

to different cropping systems (see Hossard *et al.*, submitted (a, b) for details). Therefore, cropping systems adapted to local conditions were defined for four sub-regions (3 in Picardie and 1 in Centre), but since sub-regions in region Picardie do not differ in terms of field sizes and shapes, the same field map was used for these three sub-regions.

Model simulations were run on one 17 km² map for each region, composed of 121 and 158 fields respectively for the regions Centre and Picardie (resp. located at 46°56'07-46°59'42N and 02°07'10-02°11'26E ; 49°25'54- 49°28'51N and 02°09'13- 02°15'13E). Local climatic data provided by Meteo France were used.

Cropping systems scenario characteristics and simulations

Possible future cropping systems for each region have been designed with local stakeholders (see details in Hossard *et al.*, submitted a). In the present study, only scenarios displaying RlmX-frequencies different from 0 and 100% were kept for analysis, these latter scenarios leading systematically to respectively 0 or 100% of population being virulent on RlmX-gene. Scenarios were designed in three steps: (1) identification of likely future agricultural contexts (hereafter called “trends”), (2) cropping system design taking into account these changing contexts, (3) in region Centre only, adaptation of cropping practices to different possible climatic scenarios (modifying only fungicide application (Hossard *et al.*, submitted, a, b ; Table 5.1). Thus, scenarios result from possible future agronomic or socio-economic context change (trend) that may affect farmers' decisions regarding cropping systems. As the effect of a change in the agronomic and socio-economic context on farmers' decisions cannot be precisely predicted, stakeholders defined several possible outcomes (in terms of cropping systems and in particular the proportion of resistant cultivars) for each trend. In this study, to each field is randomly assigned a crop (according to the crop proportions defined in the scenario) and if needed WOSR-cropping practices (cultivar, sowing time and density, autumnal nitrogen fertilization, fungicide application and type of tillage) (Table 5.1). Cropping systems correspond to the combination of crop and cropping practices. Finally, two climatic datasets were used: the current one (real data for years 2003-2008) vs. one that is a priori favorable to phoma stem canker epidemics (i.e. replicate of one-year data with greater extremes regarding autumnal rainfalls and temperatures).

Each scenario has then been simulated for five years (one year of initialization and four years of simulation per se). As the same scenario (landscape composition in terms of crops, varieties and cropping practices) can lead to many different spatial configurations, each scenario was simulated three times with three different (random) spatial allocation of crops and crop management (hereafter called repetitions) (Figure 5.1). Due to this randomness of crop allocation, each repetition has a different configuration of crops and practices around the fields cropped with the resistant cultivar. The analysis makes use of this “natural” variability to examine the relationship between several descriptors of the local landscape surrounding RlmX-target fields and the sustainability of disease resistance.

1.3.3. Studied variables and metrics

Firstly, cultivar choice has been shown to be the main explanatory variable at the landscape scale for resistance sustainability (Hossard *et al.*, submitted b). Secondly, small-distance pathogen dispersal has been shown to be particularly correlated with disease impact. Thirdly, RlmX-cultivars are the ones where resistance breakdown occurs. Thus the local landscape was characterized in circular buffers around each field cultivated with RlmX-cultivar (target field). Given the multi-year recurrence process of the cycle of phoma stem canker, the fields that produce inoculum (source fields) are the fields cultivated with WOSR in year $y-1$ and the target fields are those cropped with RlmX-cultivars in year y . The “local landscape” was thus characterized around each of the target fields in terms of the

A is the subset of source fields that had...	Surface-based	Density-based	Distance-based
	$\frac{\frac{1}{y} \sum_j \frac{\frac{1}{\hat{r}_j} \sum_{i \in A} s_i}{\hat{r}_j}}{\hat{r}_j}$	$\prod_y \prod_j \frac{\sum_{i \in A} s_i}{s_j}$	$\max_y \max_j \sum_{i \in A} \frac{s_i}{d_{ij}^2}$
Cultivar			
RlmX cultivars	X	X	X
Non-RlmX cultivars	X	X	X
Tillage			
Tillage after RlmX	X	X	X
Tillage after non-RlmX	X	X	X
Autumnal fertilisation			
Fertilized RlmX	X	X	X
Fertilized non-RlmX	X	X	X
Fungicides			
Treated RlmX	X	X	X
Treated non-RlmX	X	X	X

Table 5.2. Subsets of source fields (year y-1) and metrics used to describe the local landscape around target fields (year y), as a function of the considered cropping practices. Σ indicates a sum, Π indicates a mean, max indicates the maximum, y, j, i indicate summation (or average) over years (from 2 to 5), target fields and source fields, respectively, s_i indicates the acreage of field i, d_{ij} indicates the distance between fields i and j. The X indicates that a particular metric was used with the particular subset of source fields to compute an indicator variable.

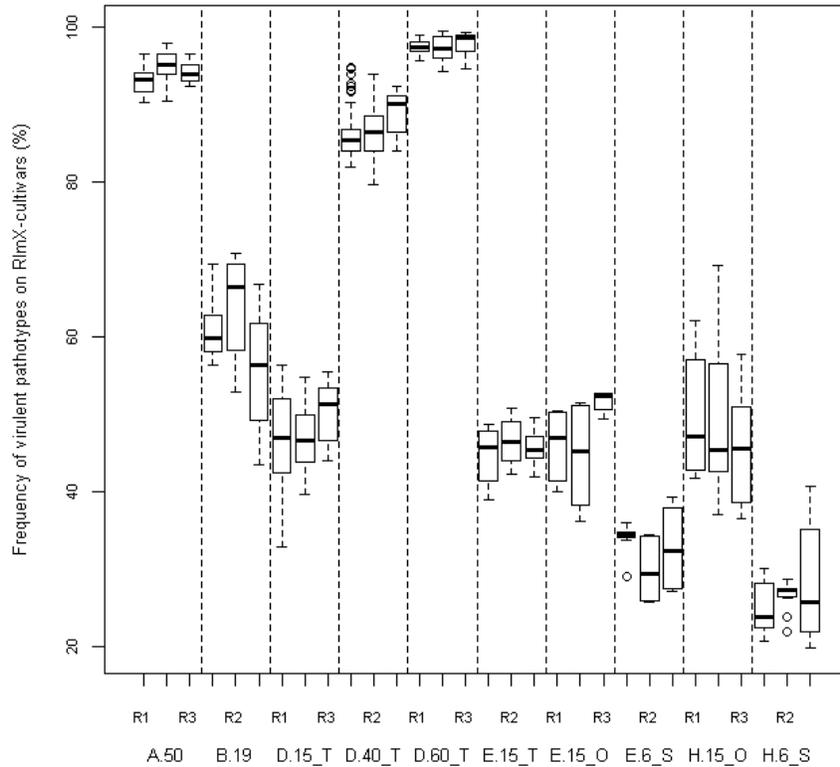


Figure 5.2. Box-plot of the simulated final frequency of virulent pathotypes (avrlmX) in each repetition of each trend (see Table 5.1 for the description of the trends). The number after the letter name of the trend indicates the fraction of RlmX cultivar (e.g. A.50 means 50% of RlmX on trend A).

acreage, within the buffer, of source fields of a given type the preceding year. Several variables were tested for the classification of source fields: the presence/absence of RlmX in the cultivar, the fact that the field residues were buried, or that it received nitrogen fertilization during autumn, or that it received fungicides during autumn. Three metrics were used to characterize the landscape around target fields across fields and years: surface-based, density-based and distance-based metrics (Table 5.2). Surface-based metrics were computed as the sum, over all years, of the sum over all target fields of the acreage of source fields of a given type A divided by the total acreage of the buffer. Density-based metrics were computed as the mean, over years, of the mean, over target fields, of the sum of acreage of fields A divided by the acreage of the target field, to account for the importance of target fields on regional outputs. Finally distance-based metrics were computed, for each target field j , as the surface of each source field i of type A within the buffer divided by the squared distance between source field i and target field j . As this last metric is meant to represent a risk factor, it is not summed or averaged over fields and years but the maximum is taken. These metrics were computed for nine buffer radii, measuring 100m and then from 250m to 2000m by steps of 250m.

Statistical analyses

The considered output for estimation of resistance sustainability was the fraction of virulent pathotypes on RlmX-gene (avrlmX), considered at the end of the simulation and at the landscape scale. Analyses were performed separately for each “future trend” batch and each WOSR frequency (Table 5.1), each batch being thus composed of one future context, one frequency of RlmX-cultivars, one WOSR frequency and associated cropping practices (Table 5.1). Simple linear models were used to assess the effects of local practices (taken one at a time) on the output avrlmX proportion. Models were compared based on the value of R^2 as well as the significance of the t-test on the estimate of the slope. For each linear model, the residuals were checked for symmetry and normality, as well as independence from fitted values. Analyses were realized with R software (R Development Core Team, 2005).

1.4. Results

1.4.1. General performances of scenarios for resistance sustainability

Model simulations of final avrlmX proportion in the population displayed large variability among future trends (Figure 5.2). The ranks of future trends were quite stable. Future trends rankings highlighted, at the landscape scale, the frequency of cropped RlmX-cultivars as the main variable impacting the frequency of virulent pathotypes on RlmX-cultivars (avrlmX): the higher this frequency, the quicker the breaking down of RlmX-gene. Regarding spatial allocation of cropping practices, the three repetitions overlapped at least partially between different simulated values of avrlmX for each future trend (Figure 5.2). Furthermore, the range of the three repetitions for a future trend varied, highlighting the necessity of considering cropping practices at a scale lower than the whole landscape.

1.4.2. Spatial indicators and scale effects

Surface-based and density-based metrics yielded determination coefficients that differed between buffering distances for all trends, unlike distance-based metrics. Since this last metric weights source field areas according to their distance, distant fields, which are included only in large buffers, will have less impact unless their areas are very large).

Although some metrics performed better at high scales, at least one metric resulted in high and significant determination coefficients when considering small buffering distances, between 100 and 500m, in all cases where output resistance sustainability (avrlmX) was significantly impacted by

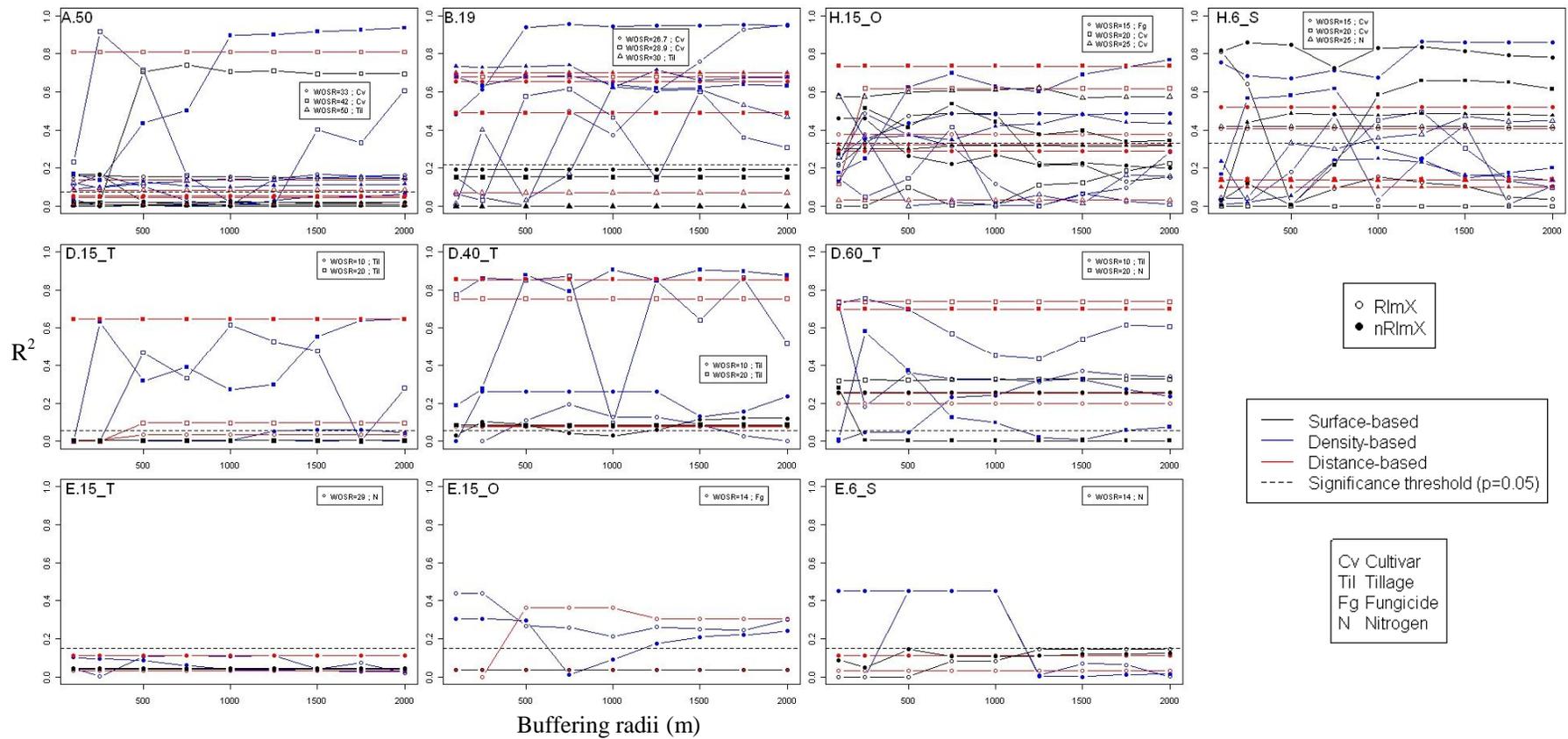


Figure 5.3. Determination coefficients of avrlmX of local indicators for the cropping practice displaying the best results (indicated in the legend of each graph) as a function of buffer size. Each graph corresponds to a trend, and sometimes the combination of a trend and a landscape WOSR frequency (see Table 5.1 1 for the trends' description). Significance thresholds were modified according to the number of scenarios tested in the trend.

cropping practices (i.e. not for E.15_T) (Figure 5.3). This scale being small enough for farmers to be able to make a decision on cropping practices to adjust to their agricultural environment, we will now mainly focus the description of the results on the three metrics computed at these buffering distances.

Ranking of surface-based, density-based and distance-based metrics differed between trends (Figure 5.3). Surface-based metrics were not significant for most trends and never yielded better significant determination coefficients than the other metrics, except for the trend H in two sub-regions of the region Picardie. This simpler metrics performed better for these sub-trends (H.6_S and H.15_O). These results show that one has to take into account the geometry of the target field and the landscape (i.e. surface of the target field, distance between source and target fields) in order to be able to predict the evolution of pathogen population towards breakdown of an RlmX-gene in an agricultural landscape composed of heterogeneous cropping practices. These results are consistent between the two regions, highlighting the relatively low impact of field organization within the landscape.

For the density-based metrics, the ranking of indicators considering RlmX or non-RlmX source fields, was not similar between trends (Figure 5.3). RlmX-metrics performed better for the trends A.50 of the region Centre, D.60_T and D.40_T (at 20% of WOSR only) of the region Picardie, these trends being the ones displaying the highest fractions of global landscape cropped with RlmX-cultivars (WOSR Frequency x RlmX-cultivars ranging from 6 to 25%, c.f. Table 5.1). Non-RlmX metrics provided better results for the trends B.19 of the region Centre, and for the trends H.15_T, H.6_S of the region Picardie. For the other trends, considering metrics on either RlmX or non-RlmX cultivars source fields provided similar determination coefficients, although not always at the same buffer size (Figure 5.3). For the distance-based metrics, metrics based on RlmX or non non-RlmX source fields did not perform differently, except for the trend A.50 of the region Centre and D.15_T and E.15_O of the region Picardie, these trends displaying very different cropping practices. Whether RlmX or non-RlmX source fields were the best predictors of resistance durability did not depend on the metric used (Figure 5.3). Looking at small-scale metrics (buffer sizes of 100-500m; Figure 5.4), metrics based on RlmX source fields were more explanatory when a high proportion of global landscape was cropped with RlmX-cultivars (WOSR Frequency x frequency of RlmX-cultivars within WOSR, Table 5.1). When less than 10% of the whole landscape received RlmX cultivars, results were as explanatory when considering either RlmX or non-RlmX source fields to predict the simulated evolution of pathogen population genetic structure towards RlmX-gene breakdown.

Cropping practices

The ranking of cropping practices that were the most influential on simulated specific resistance sustainability was not consistent between regions, sub-regions and trends, whatever the buffer size (data not shown). For small buffer sizes (100-500m) and when the proportion of the whole landscape with RlmX was high, simulated values of avrlmX were best correlated to the area cropped with the RlmX-cultivars (Figure 5.4). When RlmX was used on less than 10% of the landscape's cropped areas), indicators considering source fields characterized only by their cultivars were also among the most correlated with avrlmX simulated values (Figure 5.4), except for very low RlmX- global landscape proportion when considering RlmX source fields. When this proportion was lower than 2%, cropping practices applied on source fields were more explanatory than cultivar type only (Figure 5.4). For these trends, one has to consider the use of fungicide (E.6_S; 0.84% of RlmX in the whole landscape) or nitrogen (H.6_S_15, H.6_S_20 and H.6_S_25 with 0.9, 1.2 and 1.5% of RlmX in the whole landscape respectively) on RlmX source fields. Although these cropping practices were not the ones that varied in these trends (Table 5.1), their application on RlmX source fields significantly impacted avrlmX simulated values, avrlmX values increasing with the increase of fertilized RlmX source fields or the decrease of RlmX source fields with fungicide applications.

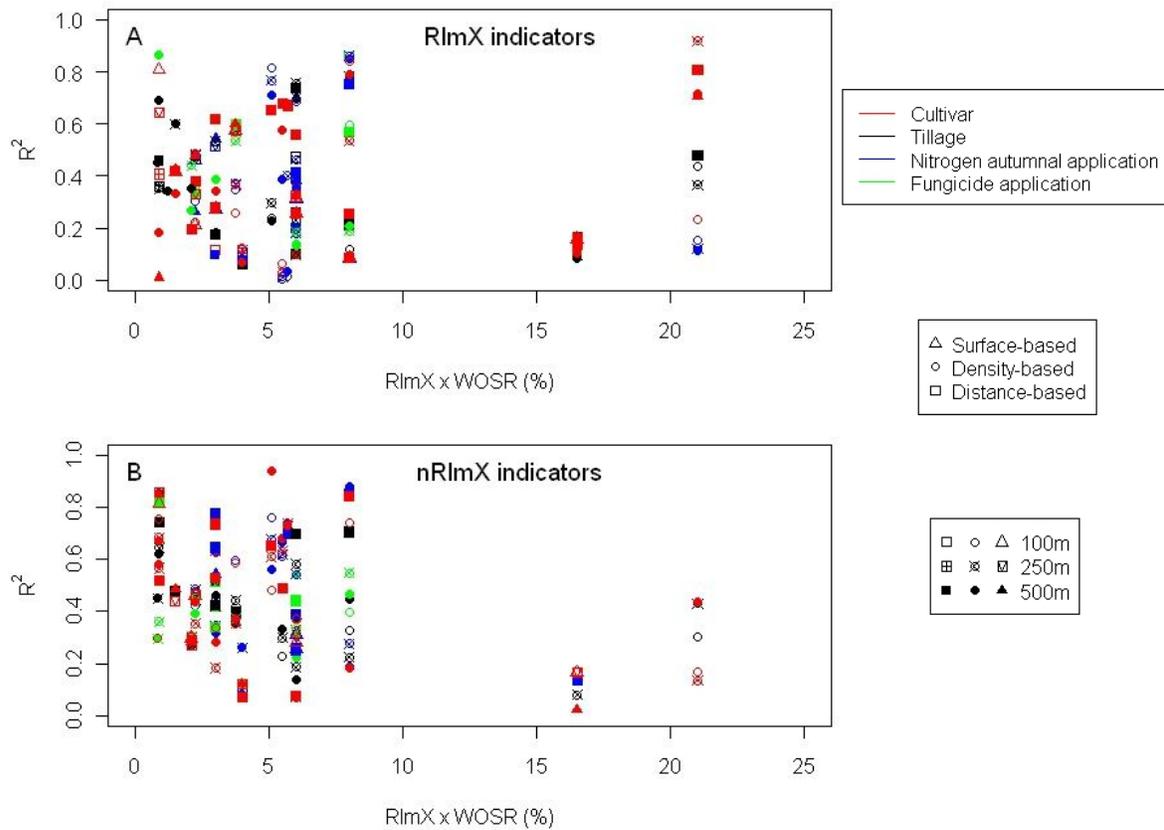


Figure 5.4. Determination coefficients of the regression between final avrlmX frequency and local (0-500m) indicators computed with three different metrics on cultivar, tillage, fungicide application and autumnal nitrogen application on (A) RlmX source fields and (B) nRlmX source fields, as a function of the landscape fraction of WOSR cropped with RlmX-cultivars. Values for the x-axis are derived from Table 5.1. For clarity reasons, only significant indicators are presented ($p < 0.05$).

Tillage practices on a given cultivar type (RlmX or non-RlmX) was also significantly correlated to avrlmX for small buffers (Figure 5.4) when their intensity varied largely, as was the case for the trends D.15_T, D.40_T and D.60_T (10% of WOSR) in region Picardie and A.50 (50% of WOSR) in region Centre (Figure 5.3). However, the determination coefficients of the regression between the indicators based on tillage and final simulated avrlmX proportion were not largely higher than the indicators obtained from cultivar composition only (determination coefficients of both Figure 5.3 and Figure 5.4).

1.5. Discussion

In this study, we analyzed and quantified the influence of local cropping practices on *Leptosphaeria maculans* genetic evolution towards breakdown of a specific resistance gene RlmX. We showed that resistance sustainability of a specific resistance gene can be largely explained by cultivars and cropping practices applied on them, in a close area around the field grown with the specific resistance. The regressions between landscape metrics computed from the acreage of fields with a certain combinations of cropping practices (including cultivar choice) and the final proportion of avirulent pathotypes were characterized by high significant determination coefficients (Figure 5.3, Figure 5.4). Thus, looking at small scale and distinguishing between cultivars when examining cropping practices provided information on pathogen population evolution towards RlmX adaptation, that remained hidden when cropping practices, including cultivars, were characterized at the scale of the whole landscape (Hossard *et al.*, submitted, b). In this previous study, tillage practices, for instance, were never significantly correlated with final avrlmX values, which is not the case in this study. Characterizing small-scale environment thanks to detailed cropping systems characteristics (including cultivars), in landscapes differing in host crop frequency, has proved to be useful when addressing issues concerning seed, insect or spores dispersal (e.g. Rusch *et al.*, 2011). However, up to now, such studies had never addressed disease resistance sustainability in simulated landscapes receiving realistic cropping practices (i.e. both actual practices and practices that are likely to be adopted in response to a change in the agricultural context, according to local experts and stakeholders). Our study could thus provide a basis for such assessments.

The most influential combinations of cropping practices and cultivars on the proportion of virulent pathotypes on RlmX-gene depend on the overall landscape composition in terms of WOSR and RlmX frequencies. However, local cultivar composition, defined at a low scale (100-500 meters), always provided good estimations of final avrlmX proportion, although this composition had to be measured on large-size buffers in some cases, i.e. higher than 500 meters (Figure 5.4). This questions the possible need of buffering distance between cultivars, i.e. to set up an isolation distance between source and target fields (that is between the fields grown with WOSR two successive years), to sustain the durable use of a RlmX specific gene against phoma stem canker. Although recommendations exist for such issue (e.g. 500 meters in Marcroft *et al.*, 2004), they are not put into practice today, as it would require collective strategies among several farmers. According to Gladders *et al.* (2006), such local strategies may be adopted by groups of farmers for isolation distances relatively small (i.e. from 0.5 to 1 km), such distances being the most relevant for management in our study. At higher scales, it would require larger collaborations between local stakeholders (seed providers, agricultural advisers, farmers). For such “segregation” strategies impacting cultivar and/or cultural practices spatial allocations, Coleno *et al.* (2009) highlighted the potential impacts that crop collector could have, by dedicating silos to specific cultivars (e.g. in the case of Genetically Modified (GM) maize). For these strategies to be implemented, it would be necessary (1) that the studied pathogen frequently causes high economic losses, so that local stakeholders are willing to take strong measures of control, and (2) that the local landscape governance permits it (Byrne and Fromherz, 2003), that particularly the local

advisers provide coherent and systematic recommendations and that each seed provider defines its strategies for consistence with the others (Coléno, 2008). Another option would be to devise policies that could constrain, at a small scale, cultivar allocation, as it has been suggested to ensure coexistence between GM and non GM crops through isolation distances depending on purity thresholds (Colbach *et al.*, 2009a).

No single metric tested in our study gave consistently the best prediction: sometimes it was a simple cultivar proportion, but more often it was a metric based on the ratios between the area of source and target fields or on the distance between source and target fields (Figure 5.3Figure 5.4). This could be linked with (a) the relatively high heterogeneity of the cropping systems assessed in this study (Table 5.1), (b) the fact that we used real-world landscapes (with heterogeneous field areas and shapes) and finally (c) the random allocations of crop, cultivar and cropping practices among fields. This reveals the complexity of spatial and temporal interactions occurring at a small scale, and the necessity to not only account for minimum distances between source and target fields, but also to take into account all the important characteristics of the local landscape surrounding avrlmX-fields. Such a landscape approach has proved to be useful to characterize other aspects of crop disease management, e.g. regional population sizes or yield losses (Hossard *et al.*, submitted, a, b) or observed levels of quantitative resistance (Papaix *et al.*, 2011). Disease management by cropping practices and cultivar deployment should thus be considered both at the scale of the whole landscape and at smaller scales for effective strategy design.

In this study, we considered separately two different simulation-support maps (Figure 5.1) for specific resistance sustainability. Although we showed the potential of a local characterization of cropping practices, for the tested cropping systems, to assess the adaptation of pathogen populations towards RlmX virulence, we did not relate this to landscape structure. The two studied agricultural landscapes have similar mean field areas (about 14 ha and 11 ha for the regions Centre and Picardie respectively), which are representatives of these regions (source: SSP Enquêtes Pratiques Culturelles 2006). However they may not be representative of other regions, including in France, so that tested buffer sizes may not be adapted to regions displaying larger or smaller mean field areas (e.g. Le Bail *et al.*, 2010 ; Viaud *et al.*, 2008). Studying in detail the effects of landscape structural variables (e.g. field perimeter, elongation and orientation; Viaud *et al.*, 2008) could be done to assess the genericity of our results. In fact, Skelsey *et al.* (2010), studying the effect of spatial heterogeneity on the spread of potato late blight, showed contrasted disease incidences for different field sizes. Thus disease management could be landscape-specific, requiring locally defined advices on practices and cultivar deployment, instead of general ones, as is usually done concerning the sustainable use of specific resistances (e.g. Gladders *et al.*, 2006).

A limit of studies based on simulation models concerns their spatial scales. Indeed, models as SIPPOM-WOSR consider an isolated agricultural landscape (Lô-Pelzer *et al.*, 2010a). Although space boundaries are necessary in simulations approaches (Coleno *et al.*, 2009; Viaud *et al.*, 2008; Colbach *et al.*, 2009b), the effect of pathogens inflows from outside the simulated landscape could be important, especially regarding their genetic characteristics. For instance, specific pathogen strains could be imported (migration) or could emerge from the existing population (genetic mutation) (McDonald and Linde, 2002). In SIPPOM-WOSR, the emergence of new genotypes is not simulated. To cope with this potential issue, all pathogens types are present at the onset of simulation (Lô-Pelzer *et al.*, 2010a). Their initial frequency within the population will influence the rate of pathogen population evolution towards resistance breakdown, but not the ranking of cropping systems or spatial strategies (Lô-Pelzer *et al.*, 2010b). However, as suggested by Travadon *et al.* (2011), widespread gene flow among French populations for *Leptosphaeria maculans* could occur, e.g. between regions.

This would suggest the necessity of enlarging the spatial scale considered in the model or to “artificially” introduce new pathogens at the border of the considered region, to account for the suggested high dispersal rates. This aspect was considered by Skelsey *et al.* (2010) by testing strategies of spatial segregation of cultivars at a regional scale. Considering these isolation distances defined at higher spatial scales would require defining and organizing strategies within and between regions of production of a specific crop for durable specific resistance management.

However, our results show that characterizing cropping practices in buffers as small as 500 meters provided useful information for resistance sustainability, whatever the frequency of RImX or WOSR defined at the landscape scale (Figure 5.3, Figure 5.4). These results are consistent with previous findings (Marcroft *et al.*, 2004) although only WOSR presence was taken into account in this previous study and other weather conditions were applied in our study. These results on the most appropriate scale were consistent between all regional trends, each trend being simulated with two climatic datasets per region. For the trends showing high correlations between weather data and avrlmX simulated values (trends E.15_T and E.15_O (Hossard *et al.*, submitted, b)), the local environment characterization was of low explanatory value (Figure 5.3). This could be related with either the small buffer sizes tested here, or the lower range of tested cropping practices in these trends (small changes in nitrogen fertilization practices and sowing times, see Table 5.1). Such small changes may affect ascospore production less than the practices tested in other trends, conversely giving more weight to the climatic inputs such as wind characteristics, which are recognized as important environmental variables affecting disease development (Hau and de Vallavieille-Pope, 2006). Therefore weather characteristics may be more influential with more homogeneous cropping systems (including cultivars) defined at the landscape scale. Defining local indicators taking into account wind orientation, i.e. orientated buffers (Viaud *et al.*, 2008), could have been more efficient than the standard circular buffer zones to evaluate the effects of these cropping systems on resistance durability. However, as wind patterns may not be stable between years and sites (e.g. Le Bail *et al.*, 2010), it might not be possible to identify a single buffer shape (or a set of shapes) useful to make tactical decisions, e.g. choosing cultivar to be cropped in the next cropping season. Thus, determining rules for cropping systems composition and allocation for disease management could benefit from a local approach, taking into account local weather and landscape characteristics. Such rules would be of great value to prevent crop damages and stabilize yields, which is a growing purpose for crop protection strategies (Leung *et al.*, 1993).

1.6. Acknowledgments

Authors would like to thank Alan Scaife for reviewing the English. This work was carried out with the financial support of the “CTPS – Comité Technique Permanent de la Sélection – French Permanent Technical Committee for Selection” under the project “Evolep”. It is part of a Ph.D project funded by INRA, AgroParisTech and ABIES. This work is part of the UMT Pivert program supported by the French ministry of Agriculture. Authors thank the SSP (Service de la Statistique et de la Prospective) of the French Ministry of Agriculture for the availability of the dataset “Enquêtes Pratiques Culturelles 2006”.

Sous-région	Tardenois (T)	Somme (S)	Oise (O)
Fréquence du colza ¹	29%	14%	14%
Dates de semis	20/08-03/09	20/08-05/09	20/08-01/09 (90% des semis)
Fertilisation azotée automnale ¹	40%	60%	20%
Densités moyennes de semis	55 gr.m ⁻²	2/3 à 25 gr.m ⁻² et 1/3 à 45 gr.m ⁻²	25% à 35 gr.m ⁻² 50% à 45 gr.m ⁻² 25% à 55 gr.m ⁻²
Variétés¹			
Avec RlmX	15%	6%	15%
Avec RQ élevé	85%	26%	85%
Avec RQ faible	0%	68%	0%
Gestion des résidus²			
Herse + covercrop	0%	100%	0%
2 covercrop	100%	0%	67%
1 covercrop	100%	0%	33%
Application de fongicide/régulateur de croissance ²	10%	20%	50%

Table 5.3. Rappel des caractéristiques des trois situations de références construites avec les acteurs en région Picardie (les pratiques culturales indiquées sont celles du colza).

¹ : pourcentage des terres cultivables ; ² : pourcentage des surfaces cultivées avec du colza d'hiver ; RQ : résistance quantitative ; gr.m⁻² : grains par mètre carré

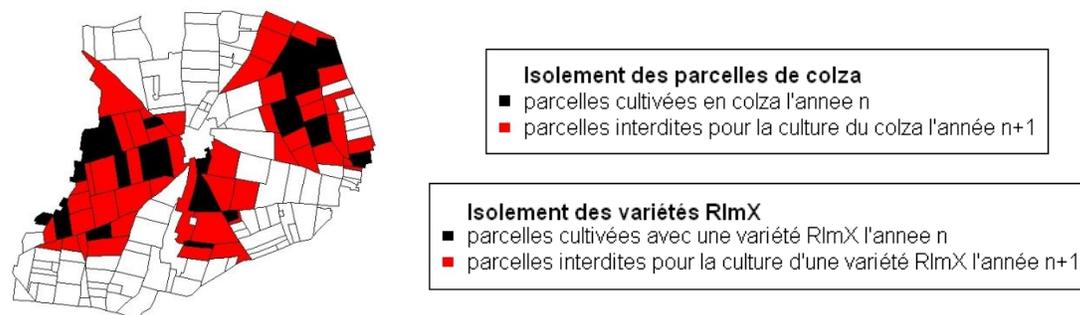


Figure 5.5. Illustration de la règle de décision spatiale pour l'isolement des parcelles de colza ou du type variétal RlmX, pour une distance d'isolement de 0 mètre (i.e. interdiction des parcelles contiguës)

2. Exploration de règles spatiales d'isolement et d'association de pratiques culturales (type variétal et gestion des résidus)

En région Picardie, lors de la réunion de restitution des résultats des scénarios d'évolution du contexte agricole, les participants ont construit de nouveaux scénarios, basés sur des règles d'isolement des parcelles cultivées en colza ou des types variétaux, combinés à d'éventuelles pratiques de gestion des résidus par type variétal. Cette partie présente d'une part ces nouveaux scénarios et d'autre part les résultats de leurs simulations.

2.1. Règles de décision

2.1.1. Règles d'isolement

Les participants ont souhaité tester l'effet de la localisation du colza et des variétés sur la gestion du phoma et la durabilité des résistances. Ils ont ainsi proposé des règles plus strictes de localisation, avec un isolement (1) des parcelles de colza (toutes variétés confondues), ou (2) des parcelles cultivées avec une variété RlmX. La règle consistait à isoler ces parcelles, c'est-à-dire à ne pas semer de colza (1) à proximité de champs cultivés avec du colza l'année précédente, ou (2) de ne pas semer de variétés RlmX à proximité de champs cultivés avec ce type de résistance l'année précédente. Quatre possibilités d'isolement ont été proposées par les participants : interdiction de semer du colza ou des variétés RlmX dans des parcelles contigües, ou se trouvant dans les 100, 500 ou 1000 mètres autour des champs cultivés l'année précédente en colza ou avec une variété RlmX respectivement (Figure 5.5).

2.1.2. Règles de gestion des résidus

En combinaison avec ces règles d'allocation spatiale, les participants ont souhaité tester l'effet de différentes stratégies de gestion des résidus. Plusieurs travaux du sol ont donc été testés : la gestion définie dans la situation de référence, une gestion très intensive (labour) et une gestion intermédiaire inspirée des travaux du sol de la région Tardenois (présentation exhaustive dans la Table 3.8, synthétisée dans la Table 3.6), et appliquée pour les deux autres situations de référence de la région Picardie, i.e. l'Oise et la Somme. Ces travaux du sol sont testés soit sur toutes les variétés, soit de manière différenciée selon les types variétaux (i.e. variétés RlmX ou non RlmX) (Table 3.6).

Sous-région	Gestion des résidus des variétés RlmX	Gestion des résidus des variétés non-RlmX
Tardenois, Somme et Oise	Labour	Labour
	Labour	Référence
	Référence	Labour
	Référence	Référence
Somme et Oise uniquement	Référence	2 covercrops
	2 covercrops	Référence
	2 covercrops	2 covercrops
	2 covercrops	Labour
	Labour	2 covercrops

Table 5.4. Gestion des résidus différenciée en fonction des types variétaux utilisée dans les simulations

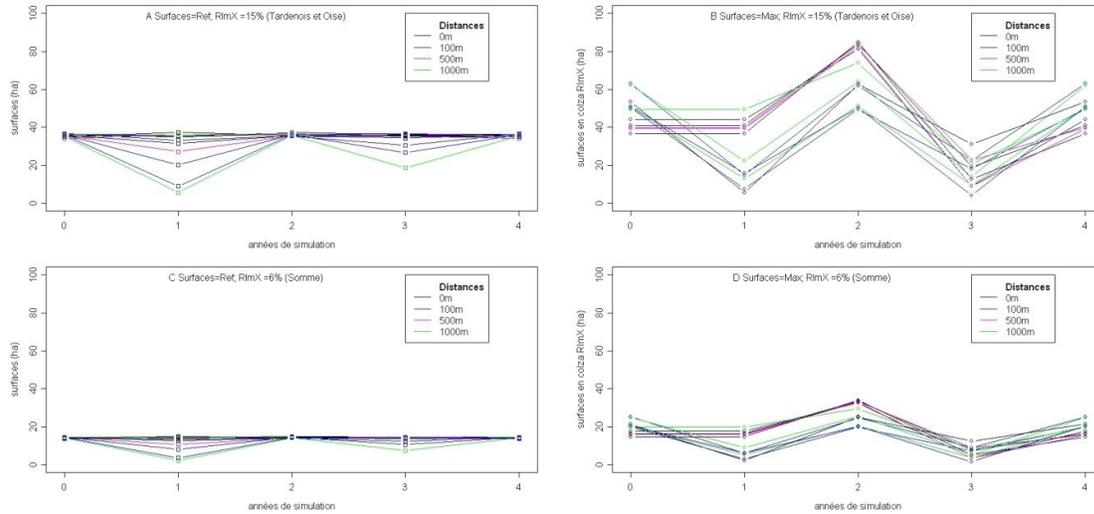


Figure 5.6. Surfaces de variétés RlmX obtenues par l'application de la règle d'isolement spatial des parcelles de colza (3 répétitions par distance)

A. Surfaces de variétés RlmX à 15% et 1/7 des surfaces en colza (si possible) ; B. Surfaces de variétés RlmX à 15% et une surface maximale de colza ; C. Surfaces de variétés RlmX à 6% et 1/7 des surfaces en colza (si possible) ; D. Surfaces de variétés RlmX à 6% et une surface maximale de colza

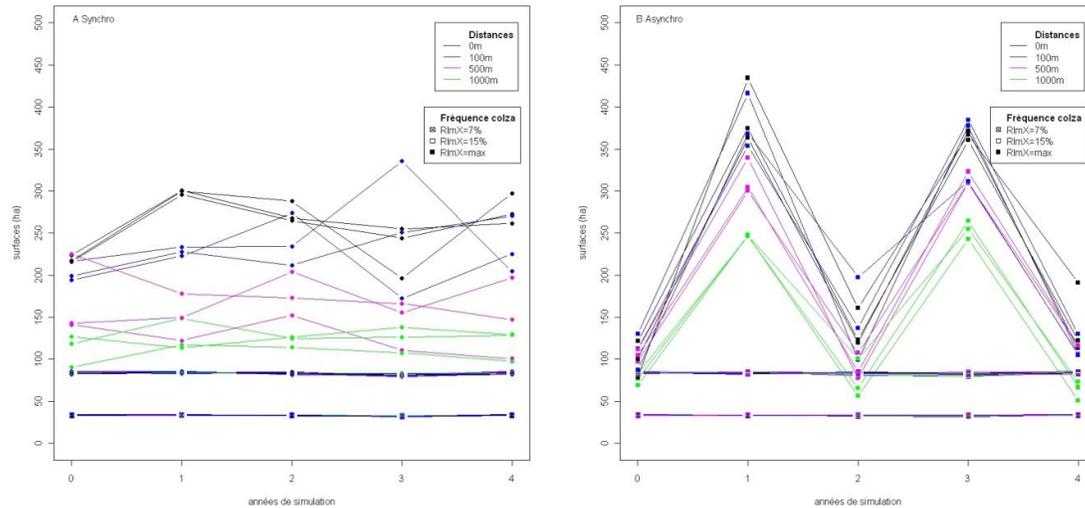


Figure 5.7. Surfaces de variétés RlmX obtenues par l'application de la règle d'isolement spatial des variétés RlmX (3 répétitions par distance)

A. Surfaces de variétés RlmX à 1/3 des surfaces en colza en cherchant une fréquence de RlmX stable dans le temps (synchronie des variétés) ; B. Surfaces de variétés RlmX à 1/3 des surfaces en colza en cherchant une fréquence de RlmX non stable dans le temps, i.e. maximisée une année sur deux (asynchronie des variétés)

2.1.3. Fréquence du colza et des variétés dans le territoire

Les participants ont souhaité explorer les fréquences de colza ou de variétés RlmX dans le territoire permettant de respecter les distances d'isolement. La règle proposée était de tester les règles sur les fréquences actuelles d'une part, et d'autre part de cultiver respectivement du colza ou une variété RlmX dès que possible, c'est-à-dire de maximiser les surfaces en colza ou en variétés RlmX. Cependant, des surfaces annuelles « cohérentes » ont été choisies pour ces scénarios, i.e. tous les scénarios conduisant à l'absence de colza ou d'une variété une année donnée ont été supprimés. Les surfaces de colza et/ou de variétés RlmX simulées dans ces scénarios ne correspondent ainsi pas aux maximums absolus pouvant être obtenus à partir du respect unique des règles d'isolement spatial.

Pour les scénarios isolant le colza, la fréquence de RlmX testée est celle de la situation de référence. Pour les scénarios isolant les variétés RlmX, la fréquence de colza testée correspond à un tiers des surfaces du territoire considéré, c'est-à-dire une rotation de 3 ans, rotation courante dans la sous-région Tardenois de la région Picardie.

Pour les scénarios d'isolement du colza, les surfaces en colza vont donc être différentes selon les distances d'isolement, tout comme les surfaces de variétés RlmX, la fréquence de ce type variétal étant constante par sous-région. Pour les scénarios d'isolement des variétés RlmX, la surface en colza est constante, et la fraction de variétés RlmX va différer en fonction des distances d'isolement considérées (plus de parcelles étant interdites l'année n+1).

2.1.4. Gestion temporelle

Contrairement aux scénarios construits précédemment dans l'étude, les participants ont proposé que, de manière à respecter ces distances d'isolement, une « asynchronie » des variétés soit possible pour les scénarios isolant les variétés RlmX, c'est-à-dire qu'il soit possible de cultiver une surface élevée de variétés RlmX une année donnée et une surface plus faible l'année suivante, de manière à maximiser la fréquence des variétés RlmX à l'échelle de la simulation (et non plus de l'année).

2.1.5. Support de simulation et autres caractéristiques des systèmes de culture

Le support de simulation utilisé est celui de la région Picardie, situé près de Beauvais (Figure 3.11). Les données climatiques utilisées sont issues de la station climatique de Beauvais (annexe C).

Les caractéristiques des systèmes de culture non définies par ces règles (date et densité de semis, gestion de la fertilisation azotée et application de fongicides) sont celles des situations de référence définies en région Picardie (Table 3.6), les participants ayant souhaité évaluer l'effet de ces règles de décision spatiale et temporelle sur les trois sous-régions identifiées en Picardie. Trois allocations des systèmes de culture aux parcelles, respectant les règles testées, ont été réalisées.

2.1.6. Détermination des surfaces maximum en colza ou en variétés RlmX

Pour déterminer les fréquences maximales de colza et de variétés, 10 000 simulations d'allocation du colza ou des variétés aux parcelles ont été réalisées pour chaque distance d'isolement, respectivement pour les règles d'isolement du colza ou des variétés. Pour chaque distance d'isolement et fréquence du colza ou des variétés RlmX testées, les trois scénarios permettant de maximiser la surface cible (i.e. colza ou variétés RlmX) ont été simulées avec SIPPOM-WOSR, correspondant aux trois allocations des systèmes de culture aux parcelles (3 répétitions). Ces calculs ont été réalisés avec le logiciel R (R Development Core Team, 2005).

Comme attendu, les surfaces en culture de colza ou de variétés RlmX diminuent lorsque l'on augmente la distance d'isolement (Figure 5.6 ; Figure 5.7), mais pas de manière drastique. Respecter

Distance d'isolement	Règle pour les surfaces de colza	Surfaces de colza (ha)	Surfaces en variétés RlmX (ha)	
		3 sous-régions ¹	Tardenois et Oise ¹	Somme ¹
0 mètre	Références	1209 / 1200 / 1201	181 / 180 / 180	73 / 72 / 72
	Maximales	1507 / 1503 / 1616	226 / 225 / 242	90 / 90 / 97
100 mètres	Références	1200 / 1173 / 1190	180 / 176 / 179	73 / 70 / 71
	Maximales	1482 / 1393 / 1381	222 / 209 / 207	89 / 84 / 83
500 mètres	Références	1149 / 1138 / 1155	172 / 171 / 173	69 / 63 / 69
	Maximales	1502 / 1495 / 1374	225 / 224 / 206	90 / 90 / 82
1000 mètres	Références	1031 / 871 / 1019	155 / 131 / 153	62 / 52 / 61
	Maximales	1168 / 1162 / 1147	175 / 174 / 172	70 / 70 / 69

Table 5.5. Surfaces totales de colza et de variétés RlmX, calculées à l'échelle de la simulation (somme sur les 5 années), associées aux scénarios explorant l'isolement des parcelles de colza.

¹Les trois nombres indiqués dans chaque case correspondent aux trois répétitions. Les surfaces en variétés RlmX sont calculées en multipliant les surfaces en colza par 15% pour les sous-régions Oise et Tardenois et par 6% pour la sous-région Somme

Distance d'isolement	Règle temporelle	Règle pour les surfaces de variétés RlmX	Surfaces en variétés RlmX (ha)
0 mètre	Synchrone	Références (S ; O-T) ¹	167/418
		Maximales ²	1293/1309/1299
	Asynchrone	Références (S ; O-T) ¹	167/418
		Maximales ²	1102/1232/1067
100 mètres	Synchrone	Références (S ; O-T) ¹	167/418
		Maximales ²	1088/1224/160
	Asynchrone	Références (S ; O-T) ¹	167/418
		Maximales ²	1229/1118/1070
500 mètres	Synchrone	Références (S ; O-T) ¹	167/418
		Maximales ²	627/889/848
	Asynchrone	Références (S ; O-T) ¹	167/418
		Maximales ²	932/945/933
1000 mètres	Synchrone	Références (S ; O-T) ¹	167/418
		Maximales ²	634/647/527
	Asynchrone	Références (S ; O-T) ¹	167/418
		Maximales ²	674/727/745

Table 5.6. Surfaces de variétés RlmX, calculées à l'échelle de la simulation (somme sur les 5 années), associées aux scénarios explorant l'isolement des variétés RlmX

¹Les trois nombres indiqués dans les cases présentant les surfaces maximales de variétés RlmX correspondent aux trois répétitions. ²Les deux nombres indiqués pour les surfaces de référence correspondent aux sous-régions Somme (S) d'une part, Tardenois et Oise (T et O) d'autre part (fréquence de RlmX de 6 ou 15% respectivement) ; ces nombres sont stables entre répétitions (fréquences de RlmX et de colza fixes (33% de colza)).

la distance d'isolement peut conduire, sans « forçage » *a priori* à une asynchronie de la culture du colza (Figures C et D de la Figure 5.6). Plus la distance d'isolement à respecter est grande, plus cette disparité interannuelle des surfaces est grande. Pour une même distance d'isolement, les surfaces de colza ou de variétés RlmX varient selon les trois allocations des cultures/variétés aux parcelles. Les fréquences de colza et de variétés RlmX restent cependant relativement stables entre les répétitions (Table 5.5 ; Table 5.6). L'asynchronie des parcelles RlmX (Figure 5.7 ; Table 5.6) ne permet pas systématiquement d'augmenter sensiblement les surfaces cultivées avec ce type variétal à l'échelle de la simulation (5 ans : une année de simulation *per se* et 4 années de simulation *per se*).

Les surfaces en colza et en variétés RlmX étant équivalentes pour les régions Tardenois et Oise, seule la région Tardenois est présentée ici, les résultats des simulations des scénarios permettant les mêmes conclusions en termes de distances d'isolement, de surfaces en colza ou en variétés RlmX.

En lien avec les options de choix des travaux du sol, le nombre de scénarios à simuler est donc différent selon les sous régions. Pour la sous-région Tardenois, les simulations pour l'isolement des parcelles de colza sont au nombre de 96 (3 répétitions x 4 gestions des résidus x 4 distances d'isolement x 2 fréquences de colza) et de 192 pour l'isolement des parcelles RlmX (3 répétitions x 4 gestions des résidus x 4 distances d'isolement x 2 fréquences de variétés RlmX x 2 gestions temporelles (synchrone/asynchrone)). Pour chacune des sous-régions Somme et Tardenois, 216 scénarios sont à simuler pour l'isolement des parcelles en colza (3 répétitions x 9 gestions des résidus x 4 distances d'isolement x 2 fréquences de colza), ce nombre étant de 432 pour l'isolement de parcelles RlmX (3 répétitions x 9 gestions des résidus x 4 distances d'isolement x 2 fréquences de variétés RlmX x 2 gestions temporelles (synchrone/asynchrone)).

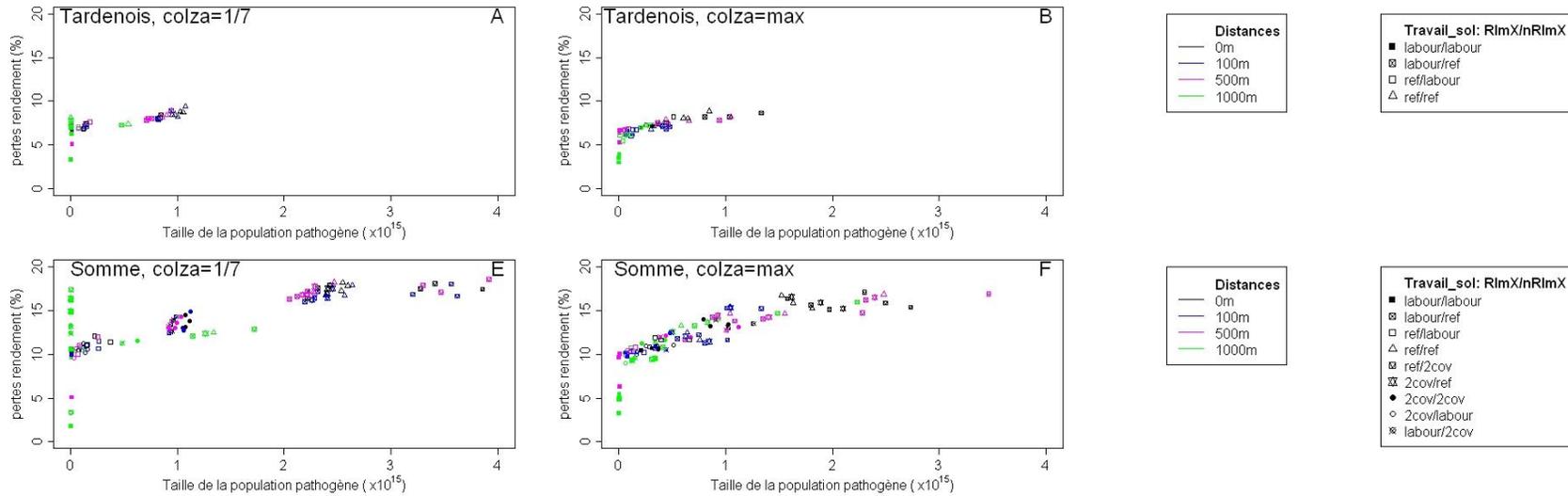


Figure 5.8. Résultats des simulations pour les scénarios explorant les règles d’isolement spatial du colza : pertes de rendement dues au phoma en fonction de la taille de la population virulente

A-B : sous-région Tardenois ; C-D : sous-région Somme ; A, C, E : fréquence du colza dans le territoire de 1/7 ; B, D, F : fréquence du colza maximisée dans le territoire. Les légendes pour les distances et gestion des résidus sont indiquées pour chaque ligne dans le dernier graphique à droite.

2.2. Résultats

2.2.1. Isolement des parcelles de colza

2.2.1.1. Taille de la population pathogène

La gamme de taille de population simulée est identique pour les sous-régions Tardenois et Oise, lorsque l'on applique un isolement des parcelles de colza, quelle que soit la fréquence de colza dans le territoire (Figures A et B de la Figure 5.8). La gamme des tailles de population pathogène est plus étendue pour la sous-région Somme (Figures E et F de la Figure 5.8). Ceci est à mettre en lien avec les types variétaux de référence cultivés dans ces trois sous-régions, avec les mêmes types variétaux pour les sous-régions Tardenois et Oise, qui ne présentent pas de variétés à faible niveau de résistance quantitative, contrairement à la sous-région Somme (Table 3.6).

Pour les trois sous-régions, les tailles de population pathogène sont globalement plus faibles lorsque la fréquence de colza est maximisée (Figure 5.8). Ceci est dû à l'asynchronie temporelle (Figure 5.6) impliquée par la maximisation des surfaces de colza (plus le nombre de parcelles en colza l'année n est grand, plus le nombre de parcelles « interdites » à la culture de colza en année n+1 sera grand).

Concernant les distances d'isolement, pour les trois sous-régions, la taille de la population pathogène diminue lorsque cette distance augmente (Figure 5.8), avec un effet particulièrement important de la distance de 1000m, pour laquelle cependant les surfaces en colza sont légèrement plus faibles (Table 5.5). Enfin, quelle que soit la fréquence de colza dans le territoire et pour les trois sous-régions, une gestion des résidus moins intensive sur les variétés RlmX par rapport aux variétés non-RlmX (i.e. les travaux du sol de référence sur les variétés RlmX vs. du labour sur les variétés non-RlmX pour les trois sous régions, deux covercrops sur les variétés RlmX vs. du labour sur les variétés non-RlmX et les travaux de référence sur les variétés RlmX vs. deux covercrops sur les variétés non-RlmX pour les sous-régions Oise et Somme), conduit à des tailles de population pathogène plus importantes (Figure 5.8).

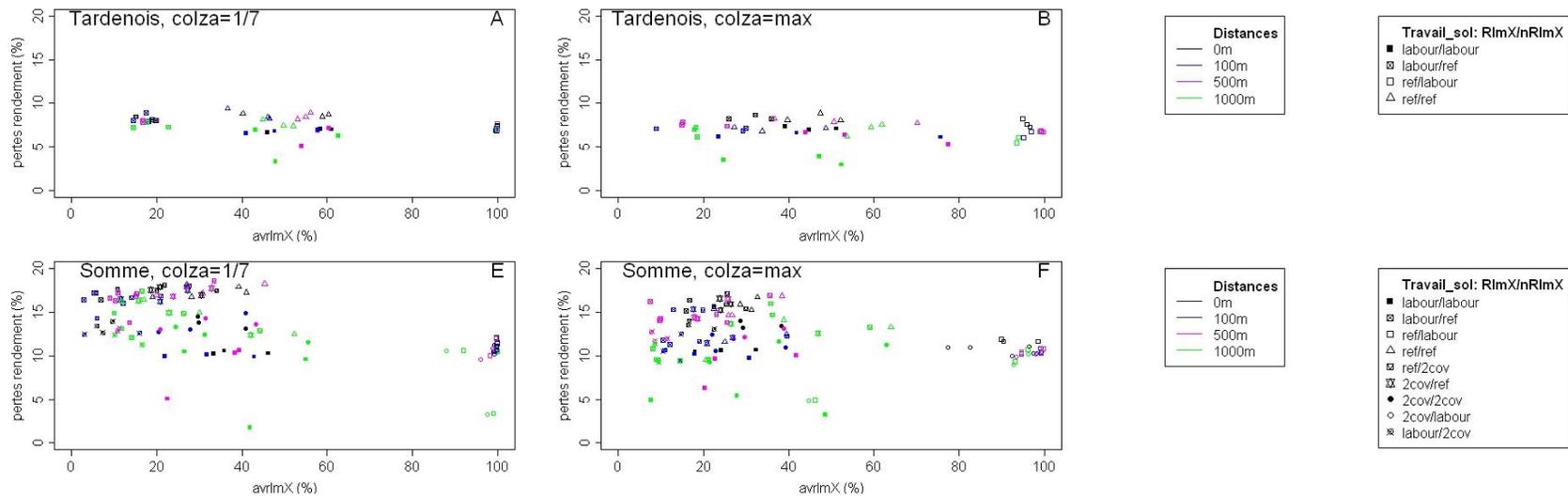


Figure 5.9. Résultats des simulations pour les scénarios explorant les règles d'isolement spatial du colza: pertes de rendement dues au phoma en fonction de la fréquence des individus virulents sur RlmX

A-B : sous-région Tardenois ; C-D : sous-région Somme ; A, C, E : fréquence du colza dans le territoire de 1/7 ; B, D, F : fréquence du colza maximisée dans le territoire. Les légendes pour les distances et gestion des résidus sont indiquées pour chaque ligne dans le dernier graphique à droite.

2.2.1.2. *Fréquence des pathotypes virulents sur RlmX*

Pour les trois sous-régions, l'application de règles d'isolement du colza, sans différenciation des types variétaux, n'a pas d'impact particulier sur la fréquence des pathotypes virulents sur les variétés porteuses du gène de résistance spécifique RlmX (Figure 5.9). Les fréquences de ces pathotypes ne sont pas, contrairement aux populations pathogènes, diminuées lorsque l'on augmente la distance d'isolement entre parcelles de colza sources (cultivées l'année n-1) et les parcelles de colza cibles (cultivées l'année n). Les fréquences de pathotypes virulents sont légèrement plus élevées lorsque la surface de colza cultivée est maximisée (Figures B, D de la Figure 5.9).

Concernant la gestion des résidus, les fréquences de pathotypes virulents sur RlmX sont classées de manière inverse à la taille des populations : une gestion des résidus de colza non-RlmX plus intensive conduit à une fréquence d'individus avrlmX plus faible (Figure 5.9), mais à une taille de population pathogène plus élevée (Figure 5.8). Les travaux du sol « actuels » (Table 3.6) présentent des fréquences intermédiaires d'individus virulents sur les variétés RlmX.

Les fréquences d'individus avrlmX sont plus faibles, pour les deux fréquences de colza, pour la sous-région Somme par rapport aux sous-régions Tardenois et Oise. Ceci est à mettre en lien avec la plus faible proportion de variétés porteuses de ce gène cultivée dans cette sous-région (i.e. 6% vs. 15% ; Table 3.6).

2.2.1.3. *Pertes de rendement*

Les pertes de rendement dues au phoma du colza, associées aux scénarios explorant l'impact d'un isolement des parcelles de colza, sont variables entre les sous-régions Oise et Tardenois d'une part, et Somme d'autre part (Figure 5.9). Ceci est également lié aux types variétaux utilisés, la sous-région Somme présentant 68% de variétés à faible résistance quantitative (Table 3.6), donc moins résistantes que les variétés cultivées dans les deux autres sous-régions. Les pertes de rendement sont faiblement impactées par l'accroissement de la distance d'isolement lorsque l'on considère une fréquence faible de colza (14%, Figure A, C et E de la Figure 5.9). A fréquence plus élevée de colza dans le territoire, l'effet de la distance d'isolement est un peu plus notable. Finalement, les pertes de rendement semblent plus affectées par les conditions de gestion des résidus, les pertes de rendement étant plus faibles lorsque les résidus sont enfouis (labour).

Les pertes de rendement sont plus variables pour la sous-région Somme, qui présente un paysage variétal plus varié, avec en particulier 68% de variétés présentant un faible niveau de résistance quantitative (Table 3.6). Le labour sur ces variétés permet donc de limiter fortement les pertes de rendement, du fait de la plus forte diminution de la population pathogène que cette gestion des résidus implique sur ces variétés.

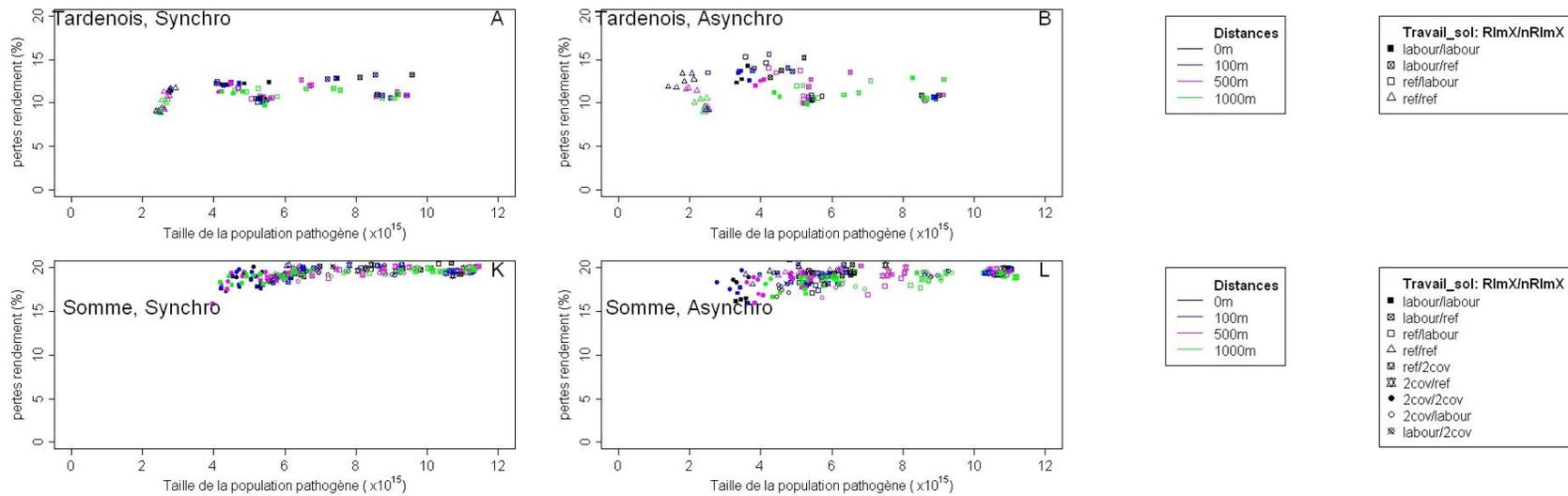


Figure 5.10. Résultats des simulations pour les scénarios explorant les règles d’isolement spatial des variétés RlmX : pertes de rendement dues au phoma en fonction de la taille de la population virulente

A-B : sous-région Tardenois ; C-D : sous-région Somme ; A, C, E : fréquence de RlmX interannuelle peu variable (synchrone) ; B, D, F : fréquence de RlmX interannuelle variable (asynchrone). Les légendes pour les distances et gestion des résidus sont indiquées pour chaque ligne dans le dernier graphique à droite.

2.2.2. Isolement des parcelles de type variétal RlmX

2.2.2.1. Taille de la population pathogène

Pour les sous-régions Tardenois et Somme, l'augmentation de la fréquence de variétés RlmX, de manière synchronisée (i.e. surfaces de RlmX relativement stables au long de la simulation) ou non-synchronisée (surfaces de variétés RlmX maximisées une année sur deux), conduit à des tailles de population élevées, quelle que soit la distance d'isolement considérée entre les parcelles RlmX de l'année n et celles de l'année n+1 (Figures A, B, E et F de la Figure 5.10). Pour ces simulations, le facteur le plus important est la gestion des résidus, qui discrimine les tailles de populations : plus la gestion des résidus est intensive, moins grande est la taille de la population, ceci étant d'autant plus vrai que les variétés les moins résistantes présente un travail du sol « plus léger » (i.e. actuel vs. labour ou 2 covercrops vs. labour respectivement sur les variétés les moins et les plus résistantes). Même à gestion des résidus constante, il y a peu d'effet de la spatialisation sur la taille de la population pathogène. Ces conclusions sont similaires quelle que soit la fréquence de RlmX dans le territoire agricole.

Il est à noter que les scénarios qui permettent de réduire le plus la taille de la population sont ceux avec l'application de deux covercrops. Ceci est à mettre en lien avec (1) les dates des travaux du sol, plus tôt après la récolte pour les covercrops et (2) la succession des travaux du sol, l'effet du semis de la culture suivante amenant en effet à la surface du sol une partie des résidus.

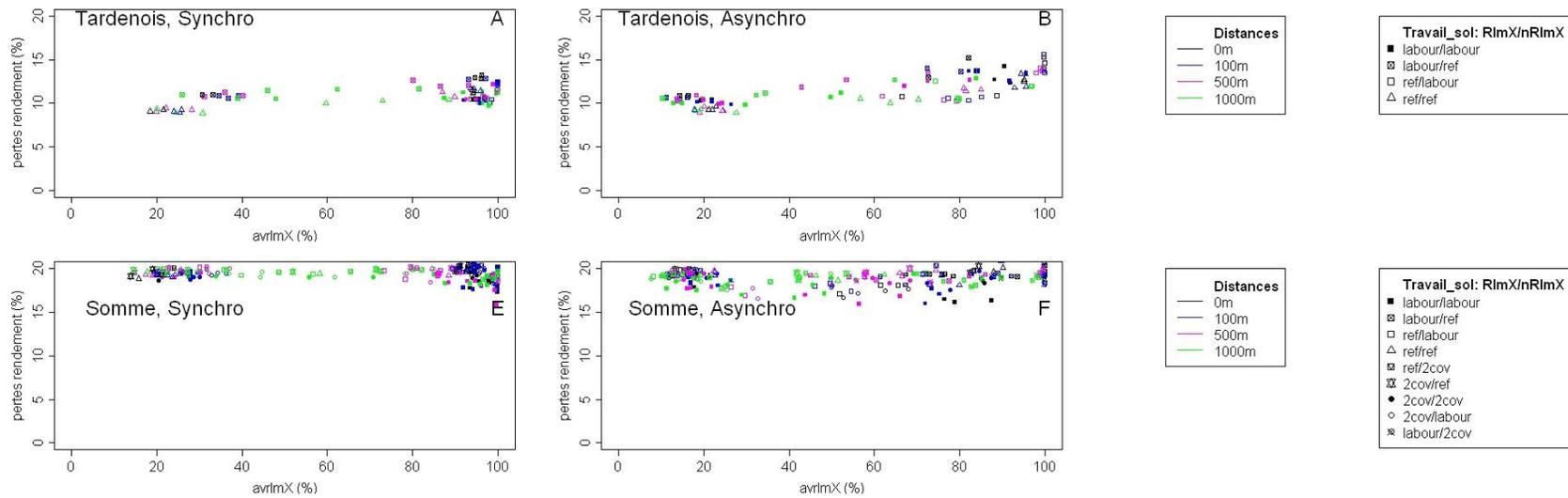


Figure 5.11. Résultats des simulations pour les scénarios explorant les règles d'isolement spatial des variétés RlmX : pertes de rendement dues au phoma en fonction de la fréquence des individus virulents sur RlmX

A-D : sous-région Tardenois ; E-H : sous-région Oise ; I-L : sous-région Somme ; A, B, E, F, I, J : pertes de rendement dues au phoma en fonction de la fraction virulente de la population sur RlmX (avrlmX) ; C, D, G, H, K, L : pertes de rendements dues au phoma en fonction de la taille de la population pathogène ; A, C, E, G, I, J : fréquence de RlmX interannuelle peu variable (synchrone) ; B, D, F, H, J, L : fréquence de RlmX interannuelle variable (asynchrone). Les légendes pour les distances et gestion des résidus sont indiquées pour chaque ligne dans le dernier graphique à droite.

2.2.2.2. *Fréquence des pathotypes virulents sur RlmX*

Si le labour est effectué sur toutes les variétés, les fréquences des pathotypes virulents sur RlmX sont très élevées. Ceci est dû au fait que l'ensemble des résidus étant enfouis de manière similaire, le pathotype RlmX sera favorisé du fait de la moindre résistance quantitative associée aux variétés RlmX par rapport aux variétés non-RlmX. L'effet de la distance entre les variétés RlmX est notable, avec une diminution de la fréquence des variétés RlmX lorsque l'on augmente cette distance.

La majorité des scénarios isolant les variétés à 1000 mètres présentent des fréquences de pathotypes virulents sur RlmX intermédiaires, qui est due aux surfaces moindres des variétés RlmX (Table 5.6). Comme pour les scénarios isolant les parcelles de colza, une gestion des résidus moins intensive sur les variétés RlmX favorise l'évolution de la population pathogène pour le contournement de cette résistance. Il est cependant à noter que pour les simulations maximisant chaque année les surfaces en RlmX (synchronie) les travaux du sol présentant 2 covercrops sont très performants lorsqu'appliqués sur toutes les variétés (Figure 5.11).

2.2.2.3. *Pertes de rendement*

Comme pour l'isolement des parcelles de colza, les pertes de rendement sont plus élevées dans la sous-région Somme que dans la sous-région Tardenois (Figure 5.11), du fait de la plus grande part de variétés peu résistantes pour la Somme. Les pertes de rendement sont plus faibles pour des distances d'isolement plus élevées, mais la différence reste faible.

Conclusion du Chapitre 5

- La localisation spatiale des types de variétés, porteuse ou non du gène de résistance considéré (RlmX et non RlmX), est le principal déterminant du contournement des résistances dans les tendances pour le futur agricole ici exploré.
- Caractériser l'environnement des parcelles de colza cultivées avec des variétés RlmX (parcelles cibles), en termes de variétés cultivées l'année précédente (parcelles sources), dans les 500 mètres autour des parcelles cible permet une bonne estimation du risque de contournement de la résistance spécifique.
- Cependant, dans un environnement agricole composé de pratiques agricoles relativement homogènes, il peut être nécessaire de caractériser les pratiques agricoles de manière plus détaillée.
- Ces conclusions s'appliquent lorsqu'aucune association particulière entre itinéraire technique et type variétal n'est appliquée. En effet, la gestion raisonnée des résidus (ex. labour sur variétés RlmX) permet de diminuer la fréquence des individus virulents sur ce gène de résistance spécifique.
- Finalement, des règles explicites d'isolement pourraient favoriser la durabilité des résistances, tout comme des règles temporelles explicites, favorisant une culture ou un type variétal un an sur deux, en association avec des travaux du sol spécifiés par variété.

Retour sur la question de recherche et l'objectif :

Les analyses réalisées nous ont permis de mettre en évidence que la caractérisation des parcelles sources, dans les 500 mètres autour des variétés RlmX cibles, permettait de bien expliquer fréquence des pathotypes virulents sur RlmX au terme des cinq années de simulation.

L'exploration de règles temporelles, spatiales et d'association d'une gestion des résidus à un type variétal, suggérées par les acteurs pour leur simulation avec SIPPOM-WOSR, a permis de mettre en évidence l'effet important de ces facteurs sur la gestion du phoma et des résistances.

Chapitre 6. Discussion générale

L'objectif principal de cette thèse était de proposer une démarche participative de construction de scénarios quantitatifs spatialisés de systèmes de culture (incluant du colza), sous hypothèses narratives, puis d'analyser ces scénarios pour évaluer leurs conséquences sur la gestion du phoma du colza et la durabilité des résistances. Cette méthode a été testée sur deux terrains d'étude, de manière à en évaluer le caractère générique. Les scénarios ont ensuite été analysés pour identifier les caractéristiques des systèmes de culture, et de leur localisation, les plus influentes sur la gestion du phoma et des résistances. Plusieurs indicateurs ont été utilisés pour cette analyse : un indicateur agronomique (pertes de rendement par rapport à une situation sans phoma) et deux indicateurs épidémiologiques (pression du bioagresseur et type de bioagresseur, i.e. respectivement taille et structure de la population pathogène). Ces analyses ont été réalisées à plusieurs échelles spatiales : à l'échelle du parcellaire-support de simulation et à une échelle plus locale (100 – 2000 mètres). Suite à ces analyses et aux réactions des acteurs face aux résultats obtenus, des scénarios répondant à des règles spatiales d'isolement (colza, variétés) ont été construits et simulés pour étudier l'effet de ces règles sur la gestion du phoma et la durabilité des résistances.

La méthode de construction des scénarios mise au point a permis de construire des scénarios quantitatifs de systèmes de culture, sous plusieurs hypothèses d'évolution du contexte économique, politique, réglementaire ou épidémiologique (appelées « tendances »). Les analyses de ces scénarios par tendance ont montré la pertinence d'utiliser plusieurs indicateurs d'évaluation de la durabilité, ceux-ci n'étant pas affectés de manière identique par les différentes pratiques agricoles. Les pratiques agricoles les plus influentes diffèrent en effet selon le type d'indicateur considéré. Les analyses des scénarios ont également montré la nécessité de considérer plusieurs échelles spatiales (parcellaire agricole, échelle locale) pour estimer les effets des pratiques agricoles sur la gestion du phoma et la durabilité des résistances. L'indicateur concernant l'aspect qualitatif du bioagresseur⁶¹ est sensible aux pratiques agricoles dans un environnement spatial plus local, par rapport aux deux autres indicateurs (taille de la population pathogène et pertes de rendement dues au phoma). Le poids relatif des caractéristiques agronomiques des scénarios construits varie selon l'évolution du contexte imaginé, les pratiques les plus influentes étant cependant la rotation⁶², le choix des variétés et des types de travaux du sol. Finalement l'exploration de règles spatialement explicites pour l'allocation des cultures ou des variétés de colza dans le territoire a montré le potentiel d'une organisation coordonnée du territoire pour contrôler durablement le phoma du colza et améliorer la durée d'efficacité d'un gène de résistance spécifique pour cette maladie.

Ce chapitre présente une mise en perspective critique de la méthode de construction de scénarios utilisée et des résultats obtenus dans cette étude.

⁶¹ Fréquence d'individus virulents vis-à-vis du gène de résistance considéré.

⁶² Représentée dans le modèle par la fréquence annuelle du colza dans le territoire.

Participation	Objectif de la participation	Compréhension partagée du fonctionnement de la maladie et apprentissage sur les principaux leviers techniques pour sa maîtrise
	Objectif des chercheurs	Méthodologique
	Implication sur la conception du modèle	Aucune
	Type d'implication sur les scénarios	Co-construction des hypothèses narratives et des scénarios quantitatifs
	Type d'acteurs	Administratifs, Agriculteurs, Services de développement, Scientifiques
Scénarios	Objectif	Exploratoire, Prédicatif
	Point de départ	Situation Initiale
	Nature	Quantitatif
	Prise en compte de l'incertitude	Oui (exploration de gammes, par exemple pour l'augmentation des surfaces en colza)
	Echelle spatiale	16-17 km ² (petit territoire agricole)
	Echelle temporelle	5 ans
	Complexité du système	Assez élevée (++)
	Causalité du modèle	Assez élevée (++)
	Nombre de scénarios produits	Plusieurs milliers

Table 6.1. Caractéristiques de la méthode utilisée et des scénarios construits dans la thèse

Si les scénarios et les modèles ne sont pas des objectifs *per se*, ils peuvent fournir des approches intégratrices et cohérentes pour construire et/ou analyser des séquences d'évènements favorables à l'atteinte d'un objectif donné, en se centrant sur les processus déterminants et les décisions nécessaires à leur mise en œuvre (Greeuw, 2000). La méthode mise en place dans cette thèse associe la construction participative de scénarios et leur évaluation par le modèle spatialement explicite SIPPOM-WOSR (Lô-Pelzer *et al.*, 2010a ; 2010b). La démarche de construction des scénarios est ici discutée, puis un retour sur le fonctionnement du modèle et ses hypothèses est réalisé.

1.1. Démarche de construction de scénarios

1.1.1. Types de scénarios construits

La démarche de construction participative des scénarios des systèmes de culture incluant du colza à l'échelle d'une petite région a permis de définir plusieurs types de scénarios au sens de Börjeson *et al.* (2006) (Figure 1.2), mettant en lumière différents facteurs de changement. Tout d'abord des scénarios prédictifs ont été construits, de type prévision (ex. augmentation de la demande en colza) et « et si ? » (ex. contournement de la résistance RlmX). Ensuite, des scénarios exploratoires ont été construits, avec des changements externes (ex. changement de réglementation) ou internes, c'est-à-dire effectués sur une variable endogène, par les acteurs eux-mêmes (ex. stratégie impliquant la mise en place de distances d'isolement). Ces scénarios ont été réalisés à partir de la situation initiale (forecasting) et sont de nature quantitative, émis sous hypothèses qualitatives vis-à-vis des facteurs de changements (*drivers*) et la nature du changement (Table 6.1). Ces différents scénarios correspondent à des évolutions de changement local (ex. contexte épidémiologique) ou global (ex. changement réglementaire à l'échelle nationale), et ont permis de définir, de manière quantitative, un nombre limité d'entrées du modèle (Vereijken, 1997). Les scénarios construits dans cette étude ont permis d'explorer la diversité des leviers, localement adaptés, pour la gestion du phoma. Ceci a été permis par (1) les discussions autour du fonctionnement de la maladie et l'identification des leviers potentiels (Etape 3 de la méthode, cf. Figure 3.2) ; (2) la diversité des acteurs présents et leur échelle locale de connaissances ; (3) la validation et/ou la construction de situation de référence locale selon la région d'étude.

Bien que les tendances identifiées soient relativement communes dans les deux terrains d'étude, le processus participatif mis en place dans l'étude a permis de générer des scénarios, pour la plupart, localement adaptés. Ils tiennent en effet compte des pratiques actuelles (ex. augmentation des Techniques Culturelles Simplifiées (TCS), de l'intensité des travaux du sol), celles-ci n'étant pas arbitraires mais dépendant d'un système socio-économique et de règles de décision des agriculteurs (Aubry *et al.*, 1998). Ces scénarios localement adaptés auraient été plus délicats à construire par une étude modélisatrice pure, basée exclusivement sur une expérimentation virtuelle (ex. Colbach *et al.*, 2009b). En effet, l'approche modélisatrice *per se* aurait difficilement permis d'appréhender la faisabilité de tels scénarios, donnant des résultats plus génériques (non basés sur des situations de culture locales) et prescriptifs (règles de décision *g* (Dury *et al.*, 2012), car proposant des solutions ne s'appuyant pas sur des pratiques locales mais plus générales, aboutissant à des conseils/règles de décision non nécessairement applicables dans tous les systèmes. Finalement, si la construction des scénarios s'était basée sur un groupe d'experts homogène et plus restreint (ex. CETIOM), le risque aurait également été d'identifier des solutions, certes efficaces pour la gestion du phoma, mais ne correspondant pas forcément aux moyens et objectifs d'action des acteurs directement concernés. La prise en compte de la faisabilité et de l'efficacité des solutions proposées est en effet un point critique dans le développement des scénarios (Voinov *et al.*, 2008). D'après Swart *et al.* (2004), pour permettre

de définir des solutions réalisables, les scénarios devraient caractériser des trajectoires de coévolution entre les systèmes humain et environnemental. La combinaison équilibrée de méthodes narratives et quantitatives peut, d'après Kemp Benedict (2004), favoriser la prise en compte des composantes de ces deux systèmes dans la définition de scénarios.

Une partie des scénarios construits par les acteurs explore des situations très tranchées, voire extrêmes, comme par exemple 100% de variétés RImX cultivées ou 100% de labour dans la région considérée. Ces scénarios, très exploratoires et peu réalistes, sont à mettre en lien avec l'approche modélisatrice utilisée dans cette étude. Les participants ont ainsi « joué » avec le modèle, de manière à tester si son fonctionnement était cohérent avec leur vision du problème. Certains scénarios semblent ainsi avoir été définis pour évaluer le modèle afin d'avoir confiance en lui, et de pouvoir par la suite tester des scénarios plus complexes. D'après les participants, ces scénarios extrêmes peu réalistes ont permis « de mieux évaluer l'impact des conseils concernant les pratiques agricoles » sur la gestion du phoma et la durabilité des résistances. Les scénarios construits ont consisté majoritairement en la combinaison exhaustive des pratiques culturelles identifiées individuellement, plutôt qu'en une combinaison limitée des pratiques organisées de manière cohérente à l'échelle d'un itinéraire technique ou d'un système de culture. Ce résultat peut être lié au fait que, parmi les acteurs impliqués, un très faible nombre d'agriculteurs était présent. Cependant, l'analyse des pratiques des agriculteurs révèle une grande diversité dans les combinaisons de pratiques (Schmidt *et al.*, 2010), qui rend réalistes la plupart de celles proposées dans les scénarios. Bien que surprenant pour l'équipe de recherche, les seules associations entre pratiques individuelles ont concerné, uniquement en région Centre, chaque pratique ayant été construite indépendamment, pour les scénarios sur les futurs contextes, en région Picardie :

- (1) la variété et la densité de semis, en cohérence avec les recommandations techniques,
- (2) le type de sol et la rotation (avec des rotations plus courtes sur les sols superficiels, en lien avec la plus faible réserve utile de ces sols et les problèmes de désherbage sur les sols plus profonds, requérant une culture de printemps en tête de rotation, comme le tournesol par exemple),
- (3) le type de sol et la fertilisation azotée, avec une fertilisation plus élevée sur les sols superficiels, plus nécessaire sur ce type de sol, d'après les acteurs locaux, pour favoriser le démarrage du colza
- (4) l'utilisation de fongicides uniquement sur les parcelles avec un sol profond, en lien avec l'expérience des acteurs locaux sur la plus forte occurrence du phoma du colza sur ce type de sol.

Le lien entre, par exemple, la durée de la rotation, l'utilisation de pesticides, et le travail du sol, pourtant observé dans l'analyse des itinéraires techniques sur colza en France (Schmidt *et al.*, 2010), n'a été proposé dans aucune des deux régions d'étude. Ainsi, un nombre limité de facteurs internes a été identifié dans les scénarios construits, un facteur interne étant défini par Leenhardt *et al.* (2010) comme un élément du système de culture duquel dépend le choix d'autres éléments du système (ex. choix de la précocité de la variété en fonction du choix de la date de semis (Maton *et al.*, 2007)). Ceci peut cependant être mis en lien avec :

- (1) l'échelle de définition de nos scénarios, définissant les pratiques à l'échelle du territoire, et non à l'échelle, plus classique, du système de culture appliqué à une parcelle : cette échelle requiert de réfléchir en termes de surfaces (spatial), ce qui a pu, durant notre étude, prendre le pas sur l'organisation des pratiques et des cultures dans le temps,
- (2) la réglementation contraignant désormais la gestion des résidus (Encadré 3.2), qui, en repoussant les dates possibles pour le travail du sol, a pu participer à limiter les associations entre, par exemple, une variété plus sensible et un travail du sol enfouissant davantage les résidus pour limiter, le cas échéant, les risques de propagation du phoma. Ainsi, le délai temporel désormais réglementaire entre la récolte et le travail du sol repousse ces travaux à une période chargée à l'échelle de l'exploitation agricole (ex. semis des colzas de l'année suivante),

(3) la possible absence de lien entre certains éléments de l'itinéraire technique pour l'agriculteur (ex. variété de colza et travail du sol après sa récolte), qui peut également être liée à la faible participation des agriculteurs à l'étude.

Par exemple, un élément interne au système, préjugé central par l'équipe de recherche, est la variété. Le lien entre une variété plus sensible et une gestion plus intense des résidus aurait pu être envisagé par les acteurs. Le choix de ce type de variété aurait également pu être déterminant pour l'utilisation de fongicide. Dans notre étude, l'indépendance de l'utilisation de pesticides vis-à-vis des autres éléments de l'itinéraire technique du colza peut être dû au fait que les acteurs n'ont eu à s'exprimer que sur les fongicides/régulateurs, ayant un effet sur la gestion du phoma. Des itinéraires techniques identifiés précédemment comme favorisant ou défavorisant la gestion du colza (Aubertot *et al.*, 2004a), différenciés selon le type de variété, aurait ainsi pu être construits pour tester leurs effets sur la gestion du phoma et la durabilité des résistances. Par exemple, les acteurs auraient pu proposer des scénarios « catastrophes » (variété sensible, semée tardivement avec fertilisation azotée automnale), à comparer avec des scénarios favorisant la gestion de la maladie (variété résistante, semée précocement sans apport azoté automnal). Ce type de scénario n'a pas été proposé dans notre étude, ce qui peut s'expliquer par le fait que ces associations de pratiques ne sont pas pratiquées localement, en lien avec la faible occurrence du phoma à l'heure actuelle, ne nécessitant dès lors pas de gestion particulière. Bien que des combinaisons de pratiques raisonnées pour la gestion du phoma (ex. variété x date de semis x gestion des résidus) aient été présentées lors de l'étude, les seules combinaisons testées ont concerné la gestion des résidus par type variétal (avec ou sans résistance spécifique), ces scénarios ayant été construits en région Picardie uniquement. Du fait de la diversité des scénarios construits, avec les leviers variété, dates de semis et gestion des résidus entre autres, ces leviers ont été croisés, mais de manière aléatoire, et non raisonnée à l'échelle de l'itinéraire technique associé à un type variétal particulier.

1.1.2. Evaluation de la méthode participative

Dans cette étude, la participation des acteurs a été organisée autour de la construction des scénarios. La construction d'un modèle homme-nature⁶³ explicite, comme dans l'approche COMMOD, aurait pu permettre de mieux quantifier les interactions entre les acteurs et leurs impacts sur les pratiques agricoles et d'intégrer leurs composantes qualitatives. La méthode ARDI (Etienne *et al.*, 2011) peut être utilisée pour élaborer ce type de modèle conceptuel. Cette méthode a été adaptée dans notre étude pour l'étape de construction du schéma collectif sur le fonctionnement de la maladie et l'identification des acteurs ayant une influence sur celle-ci (étape 3 de la méthode testée, cf. Figure 3.2). Elle n'a pas été utilisée pour construire un modèle multi-agents caractérisant les actions possibles de chaque acteur sur les leviers de gestion de la maladie, d'une part du fait que la construction de ce type de modèle est très chronophage et d'autre part du fait de la difficulté de la prise en compte de ce type de facteur pour le modèle biophysique préexistant.

A partir de modèles homme nature, des jeux de rôles peuvent être mis en place et permettre de faire émerger des solutions possibles, comme l'identification des pratiques et de leurs localisations pour réduire les risques d'érosion (Souchère *et al.*, 2009). Ce type d'approche peut permettre de construire des scénarios d'usage des sols, qui seraient cependant moins nombreux que ceux construits dans notre étude, ne permettant ainsi pas d'explorer les conséquences de contextes futurs multiples. De plus, le

⁶³ Un modèle homme-nature, aussi appelé système socio-écologique est composé d'une composante biophysique et des acteurs et institutions sociaux y étant associés. Ils sont définis par quatre caractéristiques principales : (1) un système cohérent de facteurs biophysiques et sociaux interagissant entre eux ; (2) un système défini à différentes échelles spatiales, temporelles et organisationnelles ; (3) en ensemble de ressources critiques (naturelles, socio-économiques et culturelles) dont l'utilisation est régulée par la combinaison des systèmes écologique et social ; (4) un système complexe et dynamique en constante adaptation (Redman *et al.*, 2004).

	Méthode participative mise en place dans le cadre de cette étude	
Information		
Elucidation de la complexité : experts/acteurs	+++	Hiérarchisation des pratiques agricoles et illustration des interactions/manque de lisibilité-clarté des résultats
Intégration de différents types d'information	++	Modèle intégrant l'ensemble des connaissances actuelles et paramétrage local (sol et climat) mais manques d'éléments sur certains aspects Scénarios définis localement
Prise en compte de l'incertitude	++	Climat, gamme de variation des pratiques agricoles (ex. différentes augmentation des surfaces)
Légitimité		
Représentation	++	Représentation de l'ensemble des types d'acteurs concernés, sauf les agriculteurs en Picardie
Transparence des règles et des hypothèses	++	Faible clarification des hypothèses du modèle (complexe) et plus forte clarification des hypothèses sur les tendances futures
Dynamiques sociales		
Respect/qualité des relations	+++	Très bonnes (questionnaires)
Autonomisation	++	Bonne (questionnaires)
Modification des comportements, des perspectives et apprentissage Faciliter la convergence /illustrer la diversité	-/+++	L'étude a permis d'illustrer la diversité des opinions. L'apprentissage a porté sur les leviers et le caractère spatial de la maladie, et va, selon leurs dires, amener certains acteurs à adapter leurs conseils (questionnaires)
Coûts		
Rapport coût-efficacité	0	Intermédiaires : processus d'apprentissage et évolution éventuelle du comportement (conseils)
Faibles coûts de la méthode	0	Coûts élevés de la méthode en termes d'implication de l'équipe de recherche.
Faibles coûts en cas d'échec de la décision	0	Faibles pour l'instant du fait des faibles épidémies de phoma actuelles.

Table 6.2. Evaluation de la méthode testée dans cette étude vis-à-vis des critères définis par Rauschmayer et Wittmer (2006).

(Questionnaires) : élément souligné par plusieurs participants de la région Picardie dans le questionnaire d'évaluation de la méthode.

-	Cette approche peut donner lieu à une réponse négative à la question évaluée.
0	L'approche ne porte pas spécifiquement sur cette question.
+++	L'approche se focalise explicitement et systématiquement sur cette question

rôle d'une approche de co-construction de modèle relève de l'apprentissage collaboratif face à une situation problématique plus ou moins urgente et requiert un groupe de participants hautement intéressé par la thématique (van den Belt, 2004c), ce qui ne correspondait donc pas à l'objectif de notre étude. En effet, l'objectif de la participation dans notre étude relève davantage de la « participation comme un moyen » que « comme un objectif » (van Asselt et Rijkens-Klomp, 2002 ; Encadré 1.3). Il correspond à l'identification et à la clarification des conséquences de solutions possibles au problème du phoma, en lien avec des possibles réglementations et changements de pratiques agricoles (Voinov et Bousquet, 2010). Il ne s'agissait pas ici de construire un modèle sur les interactions entre les participants et leurs impacts sur les leviers de gestion de la maladie. La méthode employée a cependant permis un partage des connaissances entre les acteurs, et entre les acteurs et les scientifiques, participant ainsi à de l'apprentissage collectif sur la gestion de la maladie (Table 6.2).

Pour évaluer le type de méthode mise en place, il peut être intéressant de s'intéresser aux conséquences opérationnelles de l'étude réalisée (Rauschmayer et Wittmer, 2006), qui pourrait être analysées ici en termes d'évolution de la composition et de l'organisation du territoire pour la culture du colza. Ces conséquences n'étant *a priori* visibles qu'à moyen ou à long terme, une technique utilisée pour estimer la qualité et l'impact de ce type d'étude est la mise en place de questionnaires *ex post* (Chermack *et al.*, 2006 ; Kok *et al.*, 2006) pour évaluer l'apprentissage ou les modifications relationnelles/de confiance entre participants/institutions (Markopoulos *et al.*, 2012). Dans notre étude, un questionnaire a ainsi été rempli, en Picardie, par les participants à la fin de la démarche participative pour cette évaluation (Annexe E). Les participants ont souligné le caractère positif de l'étude. Bien que le sujet de l'étude soit issu du monde de la recherche, il a été jugé d'actualité par les participants, l'intérêt du sujet par les participants étant un élément hautement nécessaire pour leur implication dans ce type d'étude (van den Belt *et al.*, 2010). Cet intérêt est lié à l'augmentation actuelle des surfaces en colza dans cette région, qui d'après les participants pourrait augmenter le risque d'apparition du phoma du colza. La phase de définition du problème/de la question à traiter est en effet une étape clé dans les démarches participatives (Leenhardt *et al.*, 2012 ; Hattermann *et al.*, 2012). Par ailleurs, les participants ont particulièrement apprécié le partage des connaissances entre eux, mais également avec l'équipe de recherche, ainsi que le partage des préoccupations économiques, permis par le processus exploratoire de l'étude. En fournissant un lieu pour la communication et la réflexion sur la gestion de la maladie, ce processus participatif, basé sur le partage d'opérations scientifiques et opérationnelles et l'utilisation d'un modèle, peut ainsi contribuer au développement de solutions plus durables (Rossing *et al.*, 1997) et replacer la question de cette maladie dans l'agenda « politique » (Sterk *et al.*, 2009)

Les thèmes d'apprentissage identifiés par les participants concernent les leviers « préventifs » de gestion du phoma et leur hiérarchie, certains d'entre eux soulignant l'importance de la prise en compte de la spatialisation dans le raisonnement des leviers de gestion du phoma du colza. L'importance de ce levier était, pour la plupart des participants, inconnu jusqu'alors. Un participant a ainsi indiqué, dans le questionnaire, que : « *La notion de spatialisation a changé ma manière de voir ce pathogène* ». Certains participants ont répondu que cette étude avait modifié leur manière de voir le phoma et qu'ils allaient adapter leurs conseils en termes de variétés et de travail du sol. Le point le plus saillant, discuté lors de la dernière réunion, est la volonté des Organismes de Stockage (OS) de la région Picardie de discuter avec leurs agriculteurs adhérents de la possibilité d'organiser spatialement le territoire (respect de distances d'isolement), ou d'associer un itinéraire technique à un type de variété. Ceci pourrait permettre une organisation explicite du territoire agricole par les agriculteurs : la gouvernance à l'échelle du paysage pour assurer des stratégies spatialisées requiert en effet un dialogue avec les agriculteurs (Byrne et Fromherz, 2003). L'ensemble des participants a cependant souligné la complexité du sujet et la nécessité d'adapter/ de simplifier la présentation des résultats des

simulations pour mieux évaluer les impacts des pratiques sur la gestion du phoma et de la durabilité des résistances. Cet aspect, jugé comme déterminant dans des études basées sur des modèles par Leenhardt *et al.* (2012), n'a en effet pas été discuté avec les acteurs, du fait du choix préalable du modèle et de la question à traiter. Dans le questionnaire, l'un des acteurs a souligné que cela aurait permis de clarifier les résultats et d'améliorer la qualité globale de l'étude, aspect relevé par Hattermann *et al.* (2012) et Verburg *et al.* (2006). Les participants étant par ailleurs issus de différents organismes, leurs critères d'évaluation des scénarios peuvent différer (Leenhardt *et al.*, 2012) : par exemple la durabilité est privilégiée par les sélectionneurs tandis que les pertes de rendement le sont par les OS et les agriculteurs (Savary *et al.*, 2006). En favorisant la compréhension des mécanismes biologiques sous-jacents à la durabilité des résistances, la présentation des résultats lors de l'étude est en effet restée assez complexe, ce qui est un risque en cas d'utilisation de modèle expert (i.e. non co-construit) (van den Belt, 2004c) Cette limite pourra, pour les communications futures sur l'étude, être surmontée par une présentation plus synthétique des résultats, à l'aide notamment des résultats des études statistiques, présentées dans les Chapitres 4 et 5. Une présentation à l'aide de cartes, représentant les performances de scénarios contrastés aurait pu également améliorer la lisibilité des résultats (Bacic *et al.*, 2006 ; Caminiti, 2004). Finalement, le processus participatif mis en place dans cette étude a permis la cogénération de connaissances entre chercheurs et participants (Swart *et al.*, 2004). Par ce processus, les participants ont ainsi pu acquérir/s'approprier des compétences et des connaissances pour traiter de la question de la gestion du phoma du colza, notamment grâce au caractère itératif de la démarche (Figure 3.2, Aumann, 2011), participant ainsi à « l'autonomisation » et au renforcement des compétences et des connaissances des participants (ex. Wallerstein, 1999; Blackstock *et al.*, 2007).

1.1.3. Qualité des scénarios

Alcamo et Henrichs (2008) définissent quatre critères pour évaluer la qualité de scénarios (environnementaux) : (1) leur pertinence pour les utilisateurs et les questions scientifiques ; (2) leur crédibilité (hypothèses des scénarios, transparence et rigueur des hypothèses, crédibilité du modèle) ; (3) leur créativité (remise en cause d'opinions actuelles sur l'avenir, information sur l'incertitude et ses conséquences) et (4) leur légitimité (acceptation par les participants, équitabilité, gamme d'acteurs ayant participé à leur développement).

Au regard de ces critères, les scénarios co-construits ont montré leur pertinence pour les utilisateurs (apprentissage) et pour les scientifiques, avec par exemple l'émergence de questions concernant les questions d'échelles et la pluralité nécessaire des indicateurs de gestion du phoma et de durabilité des résistances (cf. Chapitres 4 et 5). La crédibilité des scénarios dépend du type de scénarios, prédictif ou plus exploratoire. Bien que les hypothèses sur les futurs, liées à ces deux types de scénarios, aient été explicitées pour la majorité des scénarios (tendances futures), certaines hypothèses d'évolution technique, comme par exemple le retour à 100% de labour en Picardie, sont peu réalistes. Les scénarios co-construits présentent sont plus ou moins créatifs : si les scénarios impliquant des règles spatiales d'allocation du colza ou des types variétaux, tout comme les scénarios exploratoires, sont relativement créatifs (originaux), les scénarios prédictifs construits sont plus attendus. Ils informent sur les conséquences de l'incertitude (ex. gamme de variation d'une pratique), et ont partiellement remis en cause l'opinion de certains acteurs sur l'avenir, notamment en termes de choix variétaux. Ces scénarios restent cependant assez conventionnels, relevant davantage d'une transposition de visions parcellaire et annuelle aux systèmes de culture à l'échelle du territoire agricole que d'une vision dans le temps et dans l'espace (Système de Culture, Exploitation Agricole, échelle du paysage et interactions entre exploitations). Ce constat est sans doute en partie lié à l'échelle de travail habituelle de ces acteurs, qui fournissent des conseils principalement à la parcelle. Seuls les scénarios impliquant

des règles d'allocation spatiale (distance d'isolement) présentent une réelle créativité, avec un raisonnement spatial et temporel des pratiques (ex. isolement et alternance temporelle des variétés). Cependant, bien que l'évaluation des scénarios soit mono-thématique, les scénarios ont néanmoins été divers, explorant différentes hypothèses environnementales (épidémiologique, climatique) et économique pour définir les entrées des scénarios, ne se basant ainsi pas uniquement sur l'extrapolation de futurs probables du type « business as usual » (Rotmans *et al.*, 2000).

Les scénarios co-construits présentent également une certaine légitimité, du fait de la diversité des acteurs ayant participé à leur construction, et de l'acceptation des scénarios par les acteurs. L'acceptation des scénarios n'a en effet été difficile que pour les participants à l'étude n'ayant pas contribué à leur construction, ce qui n'est pas inhabituel dans ce type d'étude (Patel *et al.*, 2007) ou pour les scénarios plus « créatifs » et difficiles à implémenter, comme par exemple la mise en place de distances d'isolement. Concernant la participation et la diversité des acteurs, tous les types d'acteurs concernés au départ ont participé, mais avec une faible représentation de la part des agriculteurs, ce qui peut de fait mettre en doute la faisabilité, notamment organisationnelle et économique, de certaines modifications des pratiques ou de rotation proposées dans les scénarios. Certains nouveaux systèmes pourraient être en effet techniquement irréalisables sur certaines parcelles (ex. labour sur certains types de sol) ou incompatibles avec le système de production de certaines exploitations agricoles (Colbach, 2009). Cette faible participation peut être expliquée en partie par la faible occurrence de la maladie actuellement (i.e. définition du sujet, Swart *et al.*, 2004), mais aussi par l'organisation de l'étude elle-même. Par exemple, les groupes de participants locaux ont été créés « à partir de rien » dans cette étude, requérant ainsi une identification des acteurs et la promotion, chronophage, de l'étude par l'équipe de recherche elle-même. Cet aspect est lié au fait que cette étude n'a pas mandatée par un acteur local ou national, comme par exemple le Cetiom. Cette institutionnalisation aurait pu permettre de susciter davantage d'intérêt pour cette étude (Cornwell, 2004 ; Markopoulos *et al.*, 2012 ; Peterson *et al.*, 2004 ; Reed, 2008 ; van den Belt, 2004b), cet organisme étant connu et reconnu localement. Finalement, nous n'avons pas bénéficié de relai local dans les deux régions d'étude, qui aurait pu nous permettre d'accéder à son réseau pour promouvoir l'étude. La construction d'un partenariat solide avec un acteur local clé aurait ainsi pu nous permettre d'améliorer la participation à l'étude (Ericson, 2009), via la promotion de l'étude auprès des participants potentiels (Popper, 2008).

1.2. Retour sur l'outil d'évaluation des scénarios et sa place dans la démarche

1.2.1. Place du modèle dans l'approche et appropriation par les acteurs

Dans cette étude, le rôle du modèle est principalement orienté vers l'évaluation des scénarios construits collectivement, i.e. des futurs alternatifs. Le modèle utilisé relève ainsi davantage, selon la typologie de Malézieux *et al.* (2001), de l'outil pour gérer ou tester des systèmes que de l'outil pour la communication ou pour assister le débat. Il a également eu un rôle heuristique, au sens de Sterk *et al.* (2009), permettant l'évaluation de combinaisons de leviers pour la gestion du phoma du colza, améliorant ainsi la compréhension des effets des systèmes de culture spatialement définis.

Dans la méthode mise en place, l'outil d'évaluation des scénarios, le modèle SIPPOM-WOSR, n'a pas été modifié suite aux réunions collectives. Ceci pose la question de son acceptabilité. D'après Voinov et Bousquet (2010), l'acceptabilité d'un modèle dans des démarches participatives peut être favorisée par la contribution des participants aux hypothèses du modèle et à leur mise à l'épreuve. Dans notre étude, cette mise à l'épreuve est notamment passée par le test de scénarios extrêmes, les participants n'ayant pas contribué à l'élaboration du modèle. Il est également nécessaire que son fonctionnement et ses hypothèses soient compréhensibles et transparents (Korfmacher, 2001 ; Le *et al.*, 2010 ; Leenhardt

Ressources communes (modèle et au moins une des deux régions)	Ressources propres aux acteurs	Ressources propres au modèle
Colza et sa localisation (répartition territoriale) Variétés de colza (ressources génétiques) Phoma Travail du sol (Résidus) Azote automnal Climat (<i>eau</i>) Autres cultures et leurs localisations (aménagement paysager) Rendement (<u>compétitivité du colza, argent</u>) <i>Fongicides</i>	Repousses Cultures intermédiaires <i>Temps de travail/</i> <u>Objectifs de l'agriculteur</u> <i>Matériel agricole</i> <i>Coût de virulence</i>	Date de semis Densité de semis

Table 6.3. Synthèse des ressources incluses dans le modèle SIPPOM-WOSR et/ou identifiées lors des réunions collectives de construction des schémas ARDI en régions Centre et/ou Picardie

Source pour les ressources incluses dans le modèle : Lôt-Pelzer *et al.*, 2010a, 2010b ; *Ressources en italique* : identifiées en région Centre ; Ressources soulignées : identifiées en région Picardie ; **Ressources en gras** : ressources identifiées dans les deux régions.

et al., 2012) et que le modèle et ses résultats soient crédibles (Alcamo et Henrichs, 2008 ; Voinov et Gaddis, 2008 ; Aumann, 2011). Dans l'étude présentée ici, une étape de la méthode de construction des scénarios (Étape 3, cf. Figure 3.2) a été consacrée à la construction collective d'un « modèle conceptuel » du fonctionnement de la maladie et des acteurs dont les activités pouvaient avoir un effet sur la maladie. L'objectif de cette étape était la validation, par comparaison entre le schéma collectif et celui du modèle, du fonctionnement de celui-ci. Le fonctionnement annuel, pluriannuel et spatial du modèle a également été présenté, de manière à le rendre plus transparent aux acteurs, de manière à éviter que le modèle soit considéré par les participants comme une « boîte noire » (Caminiti, 2004). Si ces étapes ont suffi à l'acceptation du modèle, certains éléments ont été remis en cause en région Centre (exemple : calcul de l'indice de sévérité de la maladie G2). Cette remise en cause peut être liée à la meilleure connaissance locale des dynamiques et du fonctionnement (van den Belt, 2004c) de la maladie en région Centre par comparaison à la région Picardie. Cette partielle remise en cause n'a cependant pas entravé le processus de construction des scénarios (Étape 4, cf. Figure 3.2), en lien notamment l'étape de construction du schéma conceptuel inspiré de la méthode ARDI et le classement cohérent des scénarios par le modèle.

1.2.2. Eléments perfectibles et limites du modèle

1.2.2.1. *Eléments identifiés lors de l'approche participative*

Lors des discussions collectives, la majorité des ressources⁶⁴ incluses dans SIPPOM-WOSR (Lô-Pelzer *et al.*, 201a, 2010b) ont été identifiées (Annexes F et G, Table 6.3). Ces ressources sont celles ayant un impact majeur sur le contrôle du phoma et la gestion des résistances : le colza et ses variétés (ressources génétiques), le phoma (inoculum), le travail du sol (gestion des résidus), la gestion de l'azote automnal, les autres cultures (échelle du système de culture) et le climat. L'importance de la localisation des cultures (colza et autres) et des pratiques associées d'une part, et de l'intérêt d'associer un itinéraire technique à une variété d'autre part, a été identifiée uniquement en région Picardie. Ceci est à mettre en lien avec le fait que la construction de ce schéma a été réalisée avant la présentation du modèle (et donc de l'importance du levier spatial), et que cette ressource a été identifiée en Picardie par le CETIOM national (puis validée par les autres participants), cet acteur ayant participé aux réunions collectives de construction de scénarios uniquement dans cette région.

Cependant certains éléments non pris en compte dans le modèle ont également émergé lors des discussions collectives de construction des schémas, qui, selon les participants, auraient une influence sur la gestion du phoma (Table 6.3 ; Figure 3.10 ; Annexes F et G). Ces éléments concernent trois types de ressources :

- (1) le fonctionnement des résistances : le coût de virulence, lié à la nécessité pour le pathogène de s'adapter à un gène de résistance nouvellement introduit dans le paysage pour pouvoir se développer sur les variétés porteuses de ce gène ;
- (2) les cultures susceptibles d'émettre des spores : cultures intermédiaires et repousses de colza ;
- (3) les conditions de travail et objectifs de l'agriculteur : matériel agricole disponible, temps de travail.

Concernant le premier aspect, l'effet potentiel du coût de virulence a été identifié en région Centre, en lien avec les nombreuses connaissances des participants de cette région du fait de l'importance des épidémies passées. Cet aspect, non pris en compte dans le modèle, peut effectivement avoir un effet important sur la dynamique d'évolution de la structure génétique de la population. En effet, le coût de virulence est lié à la nécessité de mutation(s) du gène d'avirulence chez le pathogène. D'après Huang

⁶⁴ Etienne *et al.* (2011) définissent les ressources comme « les biens ou les produits utilisés par l'un des porteurs d'enjeu ». Dans notre cas, cette définition a été étendue à l'ensemble des éléments de la gestion de la maladie sur lesquels les acteurs peuvent agir de manière directe ou indirecte (ex. le phoma a été considéré comme une ressource).

et al. (2006), cette mutation va impliquer la perte de la fonction associée à ce gène, ce qui peut avoir un coût pour le pathogène en terme de fitness, définie par Pringle et Taylor (2002) comme la capacité de survie et de reproduction du pathogène. La capacité de changement du pathogène, lui permettant de ne plus être reconnu par la plante (i.e. perte du gène d'avirulence) peut ainsi influencer la durabilité du gène de résistance correspondant (Bent et Mackey, 2007 ; Pietravalle *et al.*, 2006). Cependant, ce coût de fitness dépend du gène de résistance considéré (Huang *et al.*, 2010). N'ayant par ailleurs pas encore été caractérisé, à notre connaissance, pour le gène de résistance Rlm7, cet élément ne peut être inclus dans le modèle SIPPOM-WOSR. Lors des discussions des résultats d'évaluation des scénarios (Etape 6 de la méthode, Figure 3.2), un autre aspect du fonctionnement des résistances a été soulevé par les acteurs de la région Centre. Il concerne l'érosion des résistances quantitatives, visible au champ selon leurs dires. Bien que ce phénomène ait été montré pour d'autres pathosystèmes (ex Andrivon *et al.*, 2007 ; Montarry *et al.*, 2012) et qu'un lien ait été observé entre le niveau de résistance quantitative observé et la composition du paysage (Papaix *et al.*, 2011), il n'a, à ce jour et à notre connaissance, pas été détecté pour les résistances quantitatives au phoma du colza.

Concernant le deuxième aspect, les participants ont trouvé que l'absence de prise en compte par le modèle des cultures intermédiaires (type CIPAN⁶⁵) et des repousses des colzas des années antérieures à l'année précédente était un peu gênante. En effet, ce problème de gestion des repousses est récurrent dans la sous-région Tardenois de la région. Pour les participants, ces repousses des années précédentes posent deux questions : d'une part elles peuvent être sources d'inoculum primaire, et d'autre part elles peuvent aboutir à des mélanges de variétés, voire de types de résistance, lorsque la parcelle présentant ces repousses est à nouveau cultivée avec du colza (rotations courtes). Concernant les CIPAN, des espèces comme la moutarde pourraient servir d'hôtes au phoma. Cette question est d'actualité, la couverture des sols agricoles devant être de 100% pendant la période à risque de lessivage azoté dans les zones vulnérables (Encadré 3.2) : ceci implique l'utilisation de CIPAN avant l'implantation des cultures de printemps. Cependant, pour que ces cultures intermédiaires participent aux épidémies de colza, il faut que le champignon ait le temps de terminer son cycle de vie. Or les résidus des CIPAN sont enfouis rapidement, avant l'implantation de la culture suivante (généralement juste avant l'hiver). Concernant les repousses de colza (dans la culture suivante), le champignon pourrait terminer son cycle de culture et participer ainsi au développement des épidémies de phoma. Selon la quantité de repousses, jugée par exemple importante en Tardenois (Picardie), il pourrait être nécessaire de les qualifier (structure génétique) et de les quantifier pour les inclure dans le modèle SIPPOM-WOSR.

Ces différents arguments, justifiant la non prise en compte de ces éléments dans le modèle, ont été exposés aux participants à l'étude, ce qui a contribué à leur acceptation du modèle.

Deux ressources prises en compte dans SIPPOM-WOSR n'ont pas été explicitement identifiées par les acteurs lors de la construction des schémas ARDI : les dates et densités de semis du colza. Ces pratiques, bien qu'ayant une influence moindre que la gestion des résidus, ont cependant un impact sur le contrôle du phoma du colza et la gestion des résistances spécifiques (Aubertot *et al.*, 2004a). Manifestement, les acteurs sous-estiment l'effet potentiel de ces techniques sur les épidémies de phoma.

⁶⁵ CIPAN : Culture Piège à Nitrates

1.2.2.2. *Domaine de validité du modèle et améliorations possibles*

Le modèle SIPPOM-WOSR a été évalué, par confrontation entre données simulées et observées, pour le contournement du gène de résistance spécifique Rlm1 (Pelzer *et al.*, 2010a). Bien que simulant une évolution un peu trop rapide de la fraction virulente de la population pathogène vis-à-vis de ce gène, le résultat des simulations était jugé satisfaisant (Figure 2.5). Cependant, il peut exister des différences entre les résistances spécifiques (Huang *et al.*, 2009). Ainsi, l'exemple de Rlm7, pris dans le cadre de cette étude comme exemple pour construire les scénarios de systèmes de culture spatialisés car plus récemment mis en culture dans un nombre important de variétés, semble avoir un comportement différent de Rlm1. Par exemple, les simulations montrent, pour la situation actuelle du Centre par exemple, une augmentation sensible de la fraction virulente de la population envers Rlm7 après 5 années de simulation pour la situation de référence (Figure 3.7). Mais la fraction virulente envers Rlm7 est actuellement estimée, après 7 années de culture, entre 9 et 17% de la population virulente (Pinochet *et al.*, 2012). Il semble donc que d'autres éléments soient impliqués dans l'évolution de la population pathogène, ce qui pourrait indiquer que le modèle sort de son domaine de validité, du fait de certains éléments (mécanismes) manquants. Comme indiqué précédemment, une hypothèse peut concerner les coûts de virulence liés à la perte du gène d'avirulence Avrlm7 par le pathogène. Une autre hypothèse peut concerner le niveau de résistance quantitative associé à Rlm7, qui « protégerait » la résistance spécifique, favorisant ainsi sa durabilité, comme montré pour le gène Rlm6 par Brun *et al.* (2010). Un autre élément qui pourrait expliquer cette faible évolution concerne la résurgence quasi-systématique de l'avirulence pour le gène Rlm3 chez le pathogène lors du contournement de Rlm7 (Daverdin, 2011), confirmée par des données au champ (Pinochet *et al.*, 2012) : si une variété possède les deux résistances, elle ne sera pas infectée. Finalement, cela pourrait être lié au fait que les individus virulents vis-à-vis de la résistance spécifique considérée sont déjà présents à l'initialisation de la simulation. En effet, il n'y a pas d'apparition de mutants dans SIPPOM-WOSR (Lô-Pelzer *et al.*, 2010a, 2010b). Ainsi, seule la phase de colonisation/propagation des individus virulents vis-à-vis de cette résistance est simulée par le modèle, or l'apparition de mutants peut être ralentie du fait des éléments mentionnés ci-dessus (coût de virulence, restauration de Avrlm3, résistance quantitative élevée). En effet, le temps nécessaire pour l'évolution de la virulence est difficilement prévisible (Pink et Puddephat, 1999), en lien avec les mutations nécessaires pour le contournement de la résistance (Daverdin, 2011).

Dans le modèle, seul l'inoculum issu des parcelles cultivées en colza l'année précédente (parcelles sources de spores) est pris en compte, les repousses de colza n'étant pas non plus représentées dans le modèle (Lô-Pelzer, 2008). Concernant les résidus des années précédentes, Alabouvette et Brunin (1970), Baird *et al.* (2002) et Turkington *et al.* (2000) ont montré que le phoma pouvait survivre sur ces résidus, jusqu'à 5 ans après la récolte, en particulier si les conditions climatiques sont peu favorables à la décomposition des résidus. Cependant, Marcroft *et al.* (2004) ont montré la faible influence quantitative de ces résidus dans les épidémies de colza. Ces résidus plus âgés pourraient cependant jouer un rôle dans le maintien de virulence (Lô-Pelzer, 2008).

Un autre élément participant à la surestimation de la vitesse de contournement d'une résistance spécifique par le modèle SIPPOM-WOSR est liée à son estimation de la sévérité de la maladie (note G2), dont va dépendre la quantité d'inoculum potentielle produite sur la parcelle ((Lô-Pelzer *et al.*, 2009 ; Lô-Pelzer *et al.*, 2010a, 2010b). La sévérité de la maladie est en effet surestimée (Boillot, 2008) du fait de la relation statistique utilisée pour son calcul (Equation 2.1 ; Aubertot *et al.*, 2004b). Cette relation empirique présente par ailleurs un domaine de validité restreint en termes de conditions climatiques (températures), ce qui pourrait également expliquer les différences entre les données

simulées et réelles. Un modèle mécaniste pourrait être développé pour améliorer la prévision de la sévérité de la maladie, intégrant divers éléments (Figure 6.1) :

- la température, dont l'augmentation peut favoriser le développement et la taille des macules (Huang *et al.*, 2006), la progression des agents pathogènes des feuilles au collet (Hammond et Lewis, 1986) et le développement de la nécrose du collet (Evans *et al.*, 2008) ;
- l'humidité, dont l'augmentation peut favoriser le développement et la taille des macules (Huang *et al.*, 2006);
- le statut azoté de la plante, qui pourrait augmenter le développement de la nécrose (Snoeijs *et al.*, 2001 ; Aubertot *et al.*, 2004a), avec deux hypothèses : la plante n'est pas stressée, et sera donc moins à même de mettre en place ses mécanismes de défense contre le pathogène, et le champignon se développera mieux dans le collet s'il a de l'azote à sa disposition.

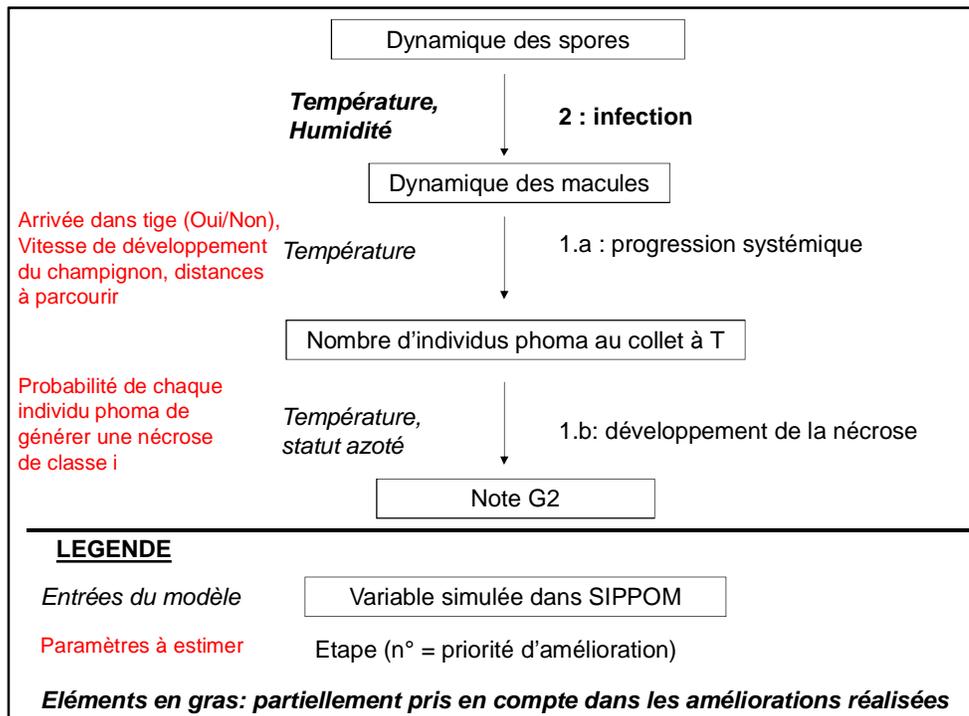


Figure 6.1. Modèle mécaniste proposé pour améliorer la prévision de l'estimation de la sévérité de la maladie (note G2)

Finalement, le spatial utilisé dans le modèle implique un « effet de bord » au bout de quelques années de simulation, qui résulte en la sortie de spores du parcellaire simulé en cas de vent unidirectionnel, sans compensation par de nouvelles spores entrant dans la zone simulée (Lô-Pelzer, 2008 ; Boillot, 2008). Cet effet pourrait être réduit en prenant un plus grand parcellaire de simulation, et en ne considérant que les parcelles centrales. Cependant, cette limite n'a pas été problématique dans notre étude du fait des caractéristiques pluridirectionnelles du vent des régions Centre et Picardie (Annexe C).

Etape	Avantage	Limite
Identification et enquête des principaux acteurs	Identification d'une large diversité d'acteurs sans parti pris Implication de scientifiques <i>Classification des acteurs selon leurs intérêts et pouvoirs</i>	<i>Pas d'appui institutionnel ou de relai local</i> <i>Pas d'analyse des acteurs</i>
Construction collective d'un schéma sur le fonctionnement de la maladie et les acteurs agissant	Validation (partielle) du fonctionnement du modèle d'évaluation Identification par les participants des principaux leviers : apprentissage collectif	<i>Moins intéressant pour les participants déjà spécialistes</i> Définition trop rapide (?) du problème pour les non-spécialistes
Construction de scénarios de systèmes de culture spatialisés	Différents types de changement de contexte (réglementaire, épidémiologique, cultural) <i>Différents types de scénarios (exploratoires, prédictifs), scénarios nombreux</i> Reflètent l'opinion de la diversité des acteurs Variabilité des SdC intra-scénario ⇒ <i>Scénarios quantitatifs sous hypothèses narratives</i>	<i>Peu de scénarios impliquant des éléments « surprenants »</i> Pas de discussion sur les indicateurs de sortie et leur présentation <i>Pas de discussion sur les échelles spatiales et temporelles à utiliser</i> Pas (peu) de facteurs de spatialisation explicites lors des premières réunions
Simulation des scénarios à l'aide de SIPPOM-WOSR	Diversité de conséquences pour la gestion du phoma et la durabilité des résistances	Domaine de validité du modèle Modèle non spécifique à la résistance actuellement utilisée (Rlm7) ⇒ Manque de réalisme ? Modèle complexe Evaluation mono-thématique
Discussion collective des résultats des simulations des scénarios	Confiance dans les résultats des simulations par les acteurs ayant participé à la définition des scénarios Identification des scénarios les plus favorables et les plus réalisables	Remise en cause par les nouveaux participants de certains résultats

Table 6.4. Synthèse des principaux avantages et des principales limites de la méthode de construction des scénarios appliquée dans cette étude.

Les étapes sont issues de la Figure 3.2. La flèche représente le caractère itératif de la construction collective des scénarios. En italique sont indiqués les éléments non identifiés par les acteurs lors des réunions ou dans les questionnaires.

1.3. Synthèse des principaux avantages et limites de la méthode de construction des scénarios

Le principal avantage de la méthode proposée est l'exploration de situations futures d'organisation spatiale de systèmes de culture, par une méthode générique permettant d'aborder des questions localement spécifiques (Vanloqueren et Baret, 2009). Une synthèse des principaux avantages et limites de la méthode mise en place, étape par étape, est présentée dans la Table 6.4. Seuls quelques éléments sont discutés ici.

Concernant les simulations, la non-spécificité du modèle à la résistance spécifique actuellement cultivée dans les deux régions a abouti à un certain manque de réalisme. Bien qu'important (Mahmoud *et al.*, 2009), cet aspect n'est pas apparu problématique lors des interactions avec les acteurs, le classement des scénarios étant jugé fiable, malgré un contournement des résistances simulé plus rapide que dans la réalité. Ceci n'a en effet pas empêché la relativement bonne acceptation des résultats des simulations par les participants ayant défini les scénarios évalués, qui a permis aux participants de comprendre comment les choix de pratiques à l'échelle du territoire peuvent affecter le futur de la maladie (Verburg *et al.*, 2005). Ceci a été réalisé malgré le manque de discussion sur les indicateurs de performances des scénarios (critères d'évaluation et sur leur présentation, qui auraient permis leur meilleure lisibilité (Aumann, 2011 ; Caminiti, 2004 ; Leenhardt *et al.*, 2012), en particulier pour les nouveaux participants. Ceci aurait également pu être permis par une discussion sur les échelles temporelle et spatiale à prendre en compte (van Delden, 2011 ; van den Belt *et al.*, 2004), l'élargissement étant cependant limité par le fonctionnement du modèle (en particulier son temps de calcul). La définition du changement d'échelle, i.e. le passage de la parcelle au parcellaire agricole, aurait pu permettre de mettre en avant plus tôt dans la démarche l'importance de ce levier pour la gestion, i.e. avant la construction du schéma ARDI. Cependant, ce levier a été mis en exergue par les répétitions des différents scénarios, nécessaires pour tester différentes allocations des variétés et des pratiques aux parcelles. En effet, sans règle d'allocation explicite, sur lesquelles se basent généralement les scénarios d'utilisation des terres (Claessens *et al.*, 2009 ; Clavel *et al.*, 2011), l'affectation des systèmes de culture aux parcelles est stochastique. Ceci nécessite des répétitions de cette distribution, relativement chronophages et donc limitantes pour les simulations (Colbach, 2010). Ceci ajoute à la complexité du modèle, Voinov et Bousquet (2010) soulignant la plus facile utilisation de modèles simples dans des approches participatives, ceux-ci étant plus faciles à expliquer et à comprendre. Selon ces auteurs, les modèles complexes présentent un domaine d'application plus étroit, requièrent des données nombreuses et présentent une incertitude plus élevée. Molina *et al.* (2011) et Walz *et al.* (2007) soulignent ainsi la difficulté de générer une implication active des différents acteurs dans son application. Cette difficulté a ainsi été surmontée dans cette étude, notamment grâce au caractère itératif de la démarche et aux démarches mises en place pour faciliter l'acceptation du modèle. Une limite notable concerne la spécificité du sujet, ici le phoma du colza, l'évaluation des scénarios étant ainsi limitée aux aspects considérés dans le modèle d'évaluation (Alcamo et Henrichs, 2008) et donc monothématique.

Le caractère itératif de la démarche, permettant la construction de nouveaux scénarios suite à la simulation de ceux construits précédemment (Figure 3.2), a permis la construction de nouveaux scénarios et leur adaptation (Alcamo, 2008b), imaginés par les participants suite à la présentation des résultats des premiers scénarios co-construits. Ceci a permis dans cette étude d'avoir des scénarios plus divers et comprenant des solutions techniques nouvelles, non imaginées dans la première série de scénarios construits, en particulier en région Picardie : gestion des résidus selon le type variétal et règle d'isolement spatial des parcelles de colza ou des types variétaux. Comme souligné par Swart *et al.* (2004), le caractère itératif a permis de promouvoir la communication entre les chercheurs et les

participants (en particulier concernant le caractère spatial), permettant ainsi d'intégrer et de tester les nouvelles idées des acteurs dans une analyse itérative des scénarios.

2. Retour sur l'application de la démarche, les scénarios et leur analyse

2.1. Comparaison des résultats de l'application de la méthode participative entre les deux régions

2.1.1. Identification des acteurs

Les acteurs identifiés lors de la 1^{ère} étape de la démarche (Figure 3.2) et ayant participé aux réunions collectives étaient issus d'une zone géographique plus large en région Picardie qu'en région Centre. Ceci est dû à deux raisons principales. Tout d'abord, les acteurs « conseillers techniques » (CETA/GEDA) travaillant sur le colza en région Picardie sont peu nombreux, du fait de la plus faible occurrence du colza dans les systèmes de culture locaux en Picardie par rapport à la région Centre. Ensuite, la diversité des OS en région Picardie, alors que la collecte du colza en région Centre est dominée par une seule coopérative, nous a conduits à impliquer plusieurs OS, localisés dans différentes zones de la région. Enfin, les contextes agronomiques de la culture du colza sont très divers, comme mentionné par l'ensemble des acteurs enquêtés en Picardie. Les acteurs ont donc été identifiés à des échelles différentes dans les deux terrains d'étude, en lien avec leur aire (géographique) d'influence (Pahl-Wostl, 2008). Ceci n'a pas eu de conséquence sur les types de tendances ou de scénarios construits collectivement, mais a abouti à la création de plusieurs situations de référence en région Picardie, permettant ainsi d'explorer et de comparer une gamme plus large de systèmes de culture.

2.1.2. Moyens d'action, perception du risque et des acteurs agissants

Concernant la vision, par les acteurs enquêtés, des degrés de concernement et moyens d'action des participants potentiels à l'étude (Figure 3.5, Figure 3.9), le positionnement des différents participants potentiels est cohérent entre les deux régions. Les semenciers sont jugés par l'ensemble des acteurs comme ceux qui sont les plus concernés et qui disposent des moyens d'action les plus élevés. Les acteurs jugent ainsi que la résistance au phoma est pour les semenciers un critère de sélection et que ceux-ci détiennent la résistance variétale, premier levier de gestion du phoma. Les agriculteurs ont des moyens d'action élevés mais sont relativement peu concernés par le problème du phoma, le comportement des agriculteurs étant cependant jugé plus variable en région Centre par rapport à la région Picardie, avec potentiellement un concernement intermédiaire vis-à-vis de la gestion de la maladie. Ceci est mis en lien avec les épidémies sévères ayant eu lieu dans cette région. Dans les deux régions, l'agriculteur est ainsi jugé comme l'acteur le plus important pour prendre les décisions sur les pratiques culturales, en cohérence avec de précédentes études (ex. Bacic *et al.*, 2006). C'est en effet le « décideur final », bien qu'identifié dans les deux régions dans les schémas concernement/moyens d'action comme ayant des moyens d'action plus faibles que les sélectionneurs. D'autres acteurs directs ont été identifiés en région Picardie (Sélectionneurs, pouvoirs administratifs). Le fait que l'agriculteur ait été identifié comme unique acteur en région Centre pourrait être lié à la participation d'un agriculteur uniquement dans cette région.

Les pouvoirs publics sont peu concernés et ont relativement peu de moyens d'action, à l'exception des Chambres d'Agriculture de Picardie qui jugent importants leurs moyens d'action via la réglementation (Encadré 3.2). Cependant, la distinction a été réalisée en région Picardie entre les instances administratives (Ministères, Europe) et l'Agence de l'Eau, ayant potentiellement un levier d'action

Zone géographique	Ratio entre les surfaces en colza et les terres arables
Centre	15.7 %
Cher	19.6 %
Eure-et-Loir	18.8 %
Indre	14.6 %
Indre-et-Loire	12.1 %
Loir-et-Cher	17.8 %
Loiret	11 %
Picardie	9.6 %
Aisne	10.4 %
Oise	11.7 %
Somme	7 %

Table 6.5. Surfaces de colza dans les différents départements des régions Centre et Picardie (source : Agreste, Statistique agricole annuelle 2011 pour la région Centre et 2010 pour la région Picardie)

financier pour des changements de pratiques agricoles. La question du phoma du colza n'étant pas prioritaire actuellement, ce levier n'est pas mobilisé. Le CETIOM est jugé très concerné, avec des moyens d'action intermédiaires. Les coopératives et négoce sont également jugés très concernés, avec des moyens d'action importants (choix du catalogue variétal, des fongicides vendus et conseils notamment sur les variétés). Ce concernement important est en cohérence avec de précédentes études (Coléno *et al.*, 2009 ; Hannachi, 2011). Les organismes de conseil agricole (CA, CETA/GEDA) ont des moyens d'actions faibles à intermédiaires, étant plus concernés en région Centre qu'en région Picardie, ce qui est cohérent avec l'occurrence locale de la culture et de la maladie.

D'autres acteurs ayant une action sur la gestion de la culture du colza et sur le phoma ont été identifiés, dans les deux régions, pendant la construction du schéma du fonctionnement de la maladie (Figure 3.10, Annexes G et H) : la recherche et les émetteurs du BSV. La recherche a principalement un rôle d'expérimentation, voire de création de ressources génétiques (ex. Rlm6, Chèvre *et al.*, 1997), et est en lien avec d'autres acteurs (CETIOM en particulier) pour échanger des références et des résultats d'expérimentations (ex. Aubertot *et al.*, 2004a). Le BSV est un moyen pour avertir les agriculteurs de la pression parasitaire localement. Ces acteurs sont classés comme indirects dans les deux régions, c'est-à-dire influençant/restreignant les choix techniques mais ne les réalisant pas eux-mêmes.

2.1.3. Mode de production des situations de référence

La situation de référence en région Centre est basée sur des données d'enquête, alors qu'elle a été co-construite en région Picardie. Cela a abouti à construire trois situations de référence, en lien avec d'une part l'échelle géographique plus large des participants, et d'autre part la plus grande diversité des contextes agricoles, notamment pédoclimatiques, en région Picardie.

Du fait de l'utilisation de données d'enquêtes locales (Civray) pour la région Centre, il a été nécessaire de caractériser les contextes agricoles de la région Centre, de manière à valider ou invalider l'utilisation de cette unique situation de référence. Selon la typologie des rotations et itinéraires techniques du colza (Schmidt *et al.*, 2010 ; Annexe B), trois stratégies agronomiques⁶⁶ dominent en région Centre : deux présentent des rotations courtes avec un colza tous les trois ans environ, la troisième stratégie présentant une durée de rotation plus longue, avec une fréquence d'un colza tous les quatre ans. Ces deux systèmes sont représentés dans la situation de référence étudiée (Annexes B et D). Les critères utilisés par Schmidt *et al.* (2010) pour définir les types de conduite culturale⁶⁷ ne permettent pas de juger de la pertinence de la situation de référence utilisée. En effet, les deux conduites culturales les plus fréquentes se différencient notamment par le type de semence utilisée (fermière vs. certifiée). Par ailleurs, la précision de l'échantillonnage des données utilisées par Schmidt *et al.* (2010) ne permet pas d'identifier si ces différentes stratégies agronomiques et conduites sont agrégées spatialement ou au contraire rencontrées de manière mixte à l'échelle locale. La diversité du territoire de la région Centre en termes de surfaces en colza (Table 6.5) étant au moins aussi élevée que celle de la Picardie, la situation de référence utilisée semble très locale et ne pourrait sans doute pas être considérée pour l'ensemble de la région Centre. Cependant, la gamme de situations agricoles explorées, en particulier en termes de surfaces de colza, définit des situations variées, avec entre 26 et 50% de colza dans le territoire agricole (Tables 3.3 et 3.4). Par ailleurs, les situations avec

⁶⁶ Les stratégies agronomiques de Schmidt *et al.* (2010) sont définies à partir de la fumure organique, du ramassage des pailles et des fréquences des céréales à paille, du colza et du labour au sein de la rotation.

⁶⁷ Les conduites culturales de Schmidt *et al.* (2010) sont définies à partir des dates et densités de semis, de la fertilisation azotée minérale et du type d'implantation du colza (avec ou sans labour).

une forte proportion de colza dans le paysage sont les plus risquées par rapport à la gestion du phoma et à la durabilité des résistances. Les résultats de la démarche, acquis pour une situation initiale locale, pourraient donc être extrapolés à l'ensemble de la région Centre, malgré la spécificité de la situation de référence.

Concernant la région Picardie, bien que trois situations de référence aient été choisies, elles ont été simulées sur le même parcellaire agricole, avec un climat unique et des types de sols identiques (Annexe A). Si le type de sol est peu influant dans SIPPOM, les conditions météorologiques pourraient avoir un impact sur la gestion du phoma, comme montré dans le Chapitre 4 et dans diverses études (ex. Huang *et al.*, 2006).

2.2. Vers des indicateurs de durabilité des résistances locaux et contextualisés

2.2.1. Quels indicateurs ?

2.2.1.1. Caractérisation de la maladie

Pour évaluer le risque de maladie et de contournement d'une résistance spécifique à son introduction dans un paysage agricole, trois indicateurs de performance ont été évalués, choisis d'après la littérature. Parmi ces trois indicateurs, la durée d'efficacité de la résistance, analysée par comparaison entre scénarios, est la variable la plus utilisée pour caractériser la durabilité de la résistance, caractérisée de manière différente selon les auteurs : à partir d'un seuil (van den Bosch et Gilligan, 2003), de valeurs absolues (Pinochet *et al.*, 2012 ; Rouxel *et al.*, 2003). La taille de la population pathogène à l'échelle de la région, et la densité régionale d'inoculum, analysés dans cette étude, sont également des indicateurs mobilisés pour caractériser la pression exercée par les agents pathogènes (respectivement Lôt-Pelzer *et al.*, 2008 ; Plantegenest *et al.*, 2007). Finalement, les pertes de rendement liées à l'effet de la maladie sont également un indicateur pertinent pour étudier sa gestion (Skelsey *et al.*, 2009). Un autre indicateur, non utilisé ici, concerne la caractérisation de la sévérité de la maladie. Souvent utilisé dans des études épidémiologiques ou caractérisant le comportement des résistances (Brun *et al.*, 2000 ; Brun *et al.*, 2010 ; Delourme *et al.*, 2008 ; Skelsey *et al.*, 2005), cet indicateur n'a pas été étudié explicitement dans les différentes analyses, mais est cependant directement pris en compte par l'indicateur sur la taille des populations pathogènes (Lôt-Pelzer *et al.*, 2010a, 2010b). L'utilisation conjointe de ces trois indicateurs pour caractériser la pression du bioagresseur et ses effets est une approche originale, la plupart des travaux se basant sur l'un d'entre eux uniquement. Ces indicateurs étant expliqués par des facteurs différents (type de pratique agricole, climat), ils apparaissent comme complémentaires pour l'analyse de stratégies en vue d'une utilisation durable des résistances et d'un contrôle efficace de la maladie. Cependant, des indicateurs plus intégrés pourraient faciliter la comparaison des différents scénarios et systèmes. Leur classement pouvant en effet diverger selon les scénarios, le choix des meilleures pratiques à adopter, en vue de la prise de décision, peut être problématique (Leenhardt *et al.*, 2012). Un tel indicateur pourrait considérer les « gains » de rendements permis par la variété résistante par rapport aux autres types variétaux en fonction du temps (Fabre *et al.*, 2012 ; van den Bosch et Gilligan, 2003). Cette variable caractériserait ainsi la pertinence de l'utilisation, dans un paysage prédéfini, de l'utilisation d'une nouvelle résistance après son introduction dans le paysage au regard de l'adaptation de la population pathogène (taille et/ou structure génétique).

2.2.1.2. Caractérisation des pratiques

Dans notre étude, les pratiques ont été construites et caractérisées de manière indépendante pour l'analyse des pertes de rendement et de la taille de la population pathogène (Chapitre 4). Ce choix se justifie par la construction des scénarios par les acteurs, ayant déterminé les pratiques de manière indépendante à l'échelle de l'itinéraire technique. Par contre, les pratiques ont été caractérisées par type variétal (i.e. avec et sans résistance spécifique) pour caractériser leur effet sur l'évolution de la fréquence virulente de la population sur le gène de résistance spécifique considéré (1^{ère} partie du Chapitre 5). Cependant, ce lien n'a pas été fait en région Centre, et uniquement pour les scénarios d'isolement en région Picardie. Malgré tout, mes résultats mettent en exergue la nécessité de considérer les types variétaux de manière indépendante (pratiques différenciées) pour favoriser la durabilité des résistances, ce type de scénario ayant en outre été souligné en Picardie. Ce type de stratégie, spécifiant les pratiques agricoles par type variétal pour le contrôle durable de la maladie, a par ailleurs été testé avec succès dans d'autres études, différenciant l'utilisation de fongicides selon le type variétal (Skelsey *et al.*, 2009a ; Skelsey *et al.*, 2009b) et raisonnant ainsi davantage les pratiques à l'échelle de l'itinéraire technique.

Le raisonnement indépendant des pratiques, à l'échelle de l'itinéraire technique et/ou du système de culture, comme réalisé dans notre étude par les participants pour la définition des scénarios, est cependant cohérent avec des pratiques agricoles observées. Par exemple, le raisonnement de la fertilisation azotée d'un blé suivant un pois tient peu compte de l'effet précédent (Schneider *et al.*, 2010). Il semble donc que, dans les pratiques agricoles réelles, les éléments des itinéraires techniques ne soient pas toujours en cohérence avec les processus.

2.2.2. A quelle échelle ?

Pour chaque scénario, les dynamiques interannuelles n'ont pas été analysées. Cependant, notre étude n'a pas nécessité cette analyse par pas de temps, du fait que (1) son objectif portait sur la comparaison des performances des scénarios, et (2) à l'exception des scénarios présentant une asynchronie interannuelle⁶⁸ (2^{ème} partie du Chapitre 5), la fréquence du colza était constante à l'échelle du parcellaire agricole. Cette approche dynamique pourrait être intéressante pour définir des « seuils » de tolérance à ne pas dépasser, comme dans le cas des OGM (Colbach, 2009). Ces seuils pourraient par exemple être définis en termes de pertes de rendement « acceptables » par les agriculteurs, à l'échelle de la parcelle et/ou de la région. Ces seuils permettraient l'identification, par modélisation, de stratégies répondant à cet objectif précis de gestion.

Du fait des échelles spatiale et temporelle du pathosystème étudié, la durabilité des résistances et la gestion des populations pathogènes ont été évaluées à l'échelle du paysage et de manière non-dynamique (analyse des résultats sur la dernière année de simulation uniquement). Si la définition des pratiques à ces échelles a permis d'appréhender la taille de la population pathogène et les pertes de rendement, une échelle plus fine apparaît nécessaire, d'après nos résultats, pour expliquer l'évolution de la structure génétique des populations pathogènes. Il a ainsi été montré que la caractérisation de ces pratiques (par type variétal) sur les parcelles sources de spores (i.e. cultivées en colza l'année n-1) dans les 500 premiers mètres autour de chaque parcelle cible (cultivée avec une variété résistante l'année n) permettait d'apporter des informations pertinentes pour expliquer le contournement de la résistance variétale. L'allocation spatiale des variétés et des pratiques est ainsi un facteur clé de la gestion du phoma du colza et des résistances variétales. Une approche caractérisant l'influence de l'environnement local, pertinente pour la gestion de certains bioagresseurs (Rusch *et al.*, 2012),

⁶⁸ Définie ici comme une fréquence élevée de colza un an sur deux.

dépend cependant de la structure et de la composition du paysage environnant des parcelles cultivées (Le Bail *et al.*, 2010 ; Skelsey *et al.*, 2010 ; Viaud *et al.*, 2008).

2.2.3. Influence de la structure physique du parcellaire agricole et du climat

Le choix des parcellaires agricoles pour les simulations n'est pas neutre. En effet, la configuration spatiale des parcelles (taille, forme) peut avoir une incidence sur les flux de bioagresseurs, d'eau, de pollen (ex. Skelsey *et al.*, 2005). Cependant, Colbach *et al.* (2009b) ont montré, dans le cas des flux de pollen de maïs OGM, la faible importance de la taille et de la forme des parcelles, au regard des effets des systèmes de culture. Il serait intéressant d'explorer la robustesse des résultats montrés dans cette étude à plusieurs structures paysagères, soit issues de la même région, soit simulées à partir du parcellaire original, à l'aide d'un logiciel comme GenExp (Le Ber *et al.*, 2009), de manière à en conserver les principales caractéristiques (distribution de la taille des parcelles et des distances entre centres des parcelles).

Concernant les caractéristiques climatiques locales utilisées dans les simulations, leur effet significatif sur certains indicateurs de la gestion de la maladie, cohérents avec de précédentes études (ex. Skelsey *et al.*, 2010), incite à une analyse plus large des climats, en particulier pour la Picardie. Au vu des changements climatiques probables, simuler les futurs paysages agricoles au regard des climats futurs possibles pourrait aider à anticiper les problèmes épidémiques potentiels engendrés par une modification des températures et des pluies. Ceci permettrait d'identifier les paysages adéquats les plus favorables la gestion d'un bioagresseur face à des possibles changements de contexte, y compris climatiques, ce qui constitue un défi majeur au vu de la nécessaire réduction des intrants chimiques.

3. De la nécessité d'une approche plus large de la gestion des bioagresseurs

3.1. Echelles et critères de décision : de la nécessité d'une approche plus systémique

3.1.1. Adaptabilité des pratiques

Mahmoud *et al.* (2009) soulignent l'importance de considérer les échelles spatiale et temporelle de la prise de décision. Dans notre étude, les parcelles sont considérées de manière indépendante, ne prenant donc pas en compte l'échelle de l'exploitation agricole (EA). Or l'EA étant le lieu de la prise de décision (Stone *et al.*, 1992), cette approche limite de fait l'exploration des déterminants de la composition du paysage agricole. D'une part, la combinaison des productions est décidée et mise en œuvre à l'échelle de l'EA (Aubry *et al.*, 1998). D'autre part, la structure du parcellaire de l'EA est un facteur explicatif de l'allocation des cultures (Thenail *et al.*, 2009), en lien avec l'organisation du travail et la disponibilité en matériel (Rounsevell *et al.*, 2003). Coléno *et al.* (2005) soulignent également la nécessité de prendre en compte les objectifs des agriculteurs, notamment en termes productifs, pour évaluer des stratégies de gestion des terres. L'échelle de l'EA, du fait de son influence sur le paysage (Joannon *et al.*, 2006), est donc une échelle importante pour considérer les pratiques agricoles. Sa prise en compte pourrait permettre de définir des facteurs de localisation des cultures et des pratiques. Intégrer les règles de décision génériques des agriculteurs et leurs déterminants pourrait contribuer à définir l'organisation spatiale et temporelle du paysage (Schaller *et al.*, 2012). D'un point de vue économique, l'exploitation agricole interagit avec une hiérarchie de systèmes biophysiques (de la parcelle à la région) et sociaux (du marché et des réglementations locales à internationales) (Volk, 2011). L'intégration des échelles pertinentes de prise de décision et de réalisation des processus biophysiques sans perte de l'intégrité de l'information est ainsi nécessaire (Dumanski *et al.*, 1998) et

requiert l'identification de critères d'organisation à ces différents niveaux (Hijmans et van Ittersum, 1996).

3.1.2. Approche multicritère

Pour la gestion du phoma et de la durabilité des résistances, typer les exploitations agricoles vis-à-vis de leur gestion du colza pourrait également aider à la prise en compte de cette échelle d'organisation. Fargue-Lelièvre *et al.* (2012) ont ainsi identifié huit types principaux de gestion de cette culture, qui peuvent être discriminés en fonction de leur risque par rapport au phoma. Ces auteurs lient ce risque à l'importance de la culture au sein de l'EA (hectares cultivés), au niveau d'intrants pour cette culture et à son aspect économique. Ils pourraient également permettre de prendre en compte une notion absente de notre étude : la rentabilité de la culture au sein du système de culture. Par exemple, l'intégration des performances annuelles, ayant un effet sur l'année suivante, pourrait permettre d'intégrer cet aspect décisionnel de manière dynamique (Gibbons et Ramsden, 2008). L'ajout d'un critère économique pour l'évaluation des scénarios, souligné comme important par les acteurs de la région Centre et non-évaluable directement par l'outil de simulation, pourrait permettre de discriminer les systèmes de gestion par une analyse multicritère (Sadok *et al.*, 2008). La prise en compte explicite de l'échelle du système pourrait également contribuer à une évaluation plus globale de la durabilité des scénarios d'organisation des systèmes de culture, en prenant en compte les trois aspects de la durabilité : environnemental, social et économique (Sadok *et al.*, 2009 ; Wei *et al.*, 2009).

Pour faire évoluer ces pratiques et diminuer le risque, Fargue-Lelièvre *et al.* (2012) identifient deux composantes de l'EA qui pourraient être modifiées : d'une part la complexité du système d'exploitation (i.e. diversité des rotations et/ou du choix variétal pour les variétés de colza), et d'autre part le travail et les ressources allouées au colza. Ces critères pourraient être utilisés pour identifier les adaptations possibles des pratiques des agriculteurs face au changement. La diversification des rotations pourrait en effet permettre une diminution de la pression globale de pathogènes et la mixité des variétés à l'échelle du territoire pourrait réduire la pression de sélection exercée sur la population pathogène (Aubertot *et al.*, 2006b). En effet, le développement de systèmes agricoles durables nécessite ainsi des négociations sur le changement, requérant la prise en compte de la dimension sociale (Rossing *et al.*, 1997), non étudiée ici.

3.1.3. Approche systémique

S'intéresser à une question locale requiert d'identifier les défis et thématiques clés du territoire en question, i.e. les priorités locales en termes d'enjeux et/ou de problèmes à résoudre (Dougill *et al.*, 2006). Il peut ainsi être nécessaire d'étudier de manière simultanée plusieurs problèmes (Sterk *et al.*, 2009), au lieu de se limiter à un seul. Il est alors nécessaire de réfléchir les stratégies de manière plus systémique, en incluant par exemple plusieurs pathosystèmes pour évaluer la durabilité de ces stratégies. En effet, certaines pratiques agricoles, favorables au contrôle d'un bioagresseur, peuvent au contraire nuire à la gestion d'un autre. Par exemple, si le labour est un moyen efficace de gérer le phoma du colza (Schneider *et al.*, 2006), il peut affecter de manière négative le parasitisme des méligèthes par ses auxiliaires (Rusch *et al.*, 2011). Pour analyser l'effet des pratiques agricoles sur plusieurs bioagresseurs, une approche modélisatrice pourrait être utilisée, l'expérimentation étant en effet difficilement accessible à cette échelle spatiale. Une possibilité serait de réaliser des modèles pluri-bioagresseurs, ou de réaliser un couplage de modèles évaluant indépendamment un bioagresseur. Il pourrait également être intéressant d'évaluer l'effet de ces stratégies sur les performances de plusieurs cultures, en se plaçant à la fois à l'échelle du système de culture et de la région. Cependant, pour des modèles mécanistes définis à ces échelles, se pose la question des processus nécessaires et suffisants pour simuler de manière pertinente, mais non simpliste, l'effet de ces stratégies.

L'acquisition de données pour paramétrer ces processus requiert des données sur plusieurs années et à une échelle large, certains de ces processus pouvant en outre dépendre des conditions climatiques. Au vu de ces difficultés, une option pourrait être d'utiliser des modèles décisionnels qualitatifs, comme DEXiPM (Pelzer *et al.*, 2012), pour évaluer les performances de ces systèmes sur plusieurs thématiques. Pour construire les systèmes de culture à évaluer, il serait alors nécessaire d'inclure les acteurs compétents pour chaque thématique, de manière à construire des systèmes de culture innovants et durables pour la gestion de diverses thématiques.

3.2. *Approches individuelles vs. collectives*

Bien qu'il soit difficile d'extrapoler des principes généraux des résultats des deux cas d'étude, la comparaison de multiples leviers au sein de chaque région pourrait permettre d'émettre des recommandations spécifiques de gestion face à des changements de contexte (Shea *et al.*, 2000). Ces recommandations peuvent être à l'échelle de la parcelle (itinéraire technique par variété) ou à l'échelle pluri-parcellaire (fréquence du colza dans le paysage). Elles s'adressent ainsi à l'agriculteur de manière individuelle, ou nécessitent une coordination entre exploitations agricoles, qui pourrait par exemple être organisée par les organismes de collecte et de stockage. En adaptant leurs conseils, les acteurs du monde agricole pourraient favoriser la gestion de la maladie, Maton *et al.* (2005) soulignant une certaine uniformité comportementale entre les agriculteurs conseillés par les mêmes personnes. Comme souligné par les participants à notre étude, il est alors important que les recommandations soient cohérentes entre les différentes sources d'information (Dougill *et al.*, 2006).

Pour coordonner les systèmes de culture à l'échelle pluri-parcellaire et maintenir un paysage favorable à la gestion d'une problématique donnée, la prise en compte d'échelles intermédiaires entre la parcelle et le territoire agricole peut être utile. Pour instaurer un isolement spatial par exemple, l'îlot culturel⁶⁹ peut être pertinent pour la gestion individuelle à l'échelle de l'exploitation agricole. Cependant, selon la taille des îlots et le degré d'agrégation du parcellaire d'un exploitant, la mise en place de stratégies d'isolement peut nécessiter une coordination entre plusieurs exploitations agricoles. Ces stratégies « de séparation » nécessitent une allocation explicite des variétés par exemple, pour permettre la gestion d'une thématique spatialisée (Sausse *et al.*, 2012). Ce type de stratégie peut être mis en place par des collectifs d'agriculteurs, créant une « mosaïque de gestion » à l'échelle du paysage pour gérer un problème donné (Melman *et al.*, 2008), et pourrait être subventionné à la condition du maintien de l'effet bénéfique de cette organisation sur ce problème (Moreira *et al.*, 2005). Une approche « bottom-up » pourrait alors être plus adéquate qu'une approche « top-down », permettant de mieux intégrer la faisabilité de telles stratégies (Melman *et al.*, 2008). L'utilisation d'outil d'aide à la décision serait alors envisageable, sous réserve d'une connaissance suffisante des systèmes de culture locaux spatialement définis. Une approche intermédiaire pour la localisation des systèmes de culture pourrait être définie par les organismes de collecte et de stockage, reconnus comme des gestionnaires importants de l'organisation et de la structuration du territoire agricole (Coléno, 2008). La gestion du territoire pourrait ainsi être organisée, y compris spatialement, par ces porteurs d'enjeux, via la coordination ou la formalisation (ex. contrat à la variété) de certaines pratiques agricoles (Hannachi, 2011).

⁶⁹ Un îlot culturel est « constitué par un ensemble de parcelles culturales exploitées par un même agriculteur, défini entre des limites pérennes » (ex. routes) (Covadis, 2009).

Conclusion et perspectives

Ce travail de thèse a permis de proposer et de tester une méthode de construction de scénarios d'organisation de systèmes de culture, à l'échelle d'une petite région, alliant démarche participative et modélisation. Cette démarche participative se compose de différentes étapes, avec l'identification des acteurs clés, la construction collective d'une vision commune de la maladie, puis la construction, l'évaluation numérique et la discussion des scénarios construits collectivement. L'approche scénario ici définie a permis de construire, avec des acteurs locaux, des scénarios quantitatifs sous hypothèses narratives, ensuite évalués à l'aide d'un modèle préconstruit. Son application sur deux terrains d'étude a permis de déterminer, avec les porteurs d'enjeux locaux impliqués dans la gestion des pratiques agricoles, des scénarios d'organisation de systèmes de culture possibles face à de possibles futurs changements de contexte. L'analyse pluri-échelle de ces scénarios a permis d'identifier les leviers mobilisables en fonction de ces contextes et les échelles pertinentes pour la gestion du phoma du colza et des résistances.

La durabilité des résistances spécifiques, ressources finies, est un défi majeur du fait de l'adaptation des populations pathogènes. Ces ressources, permettant une utilisation moindre des pesticides du fait de leur protection de la culture, doivent, pour être durables, être utilisées avec précaution dans les paysages agricoles. Leur déploiement dans le temps et dans l'espace agricole va influencer, comme montré dans cette thèse, sur l'évolution des populations pathogènes. L'adaptation des pratiques agricoles peut favoriser cette durabilité, en particulier si cette adaptation est réalisée par type variétal. Cependant, pour être efficaces, les variétés résistantes et les pratiques agricoles doivent être organisées au sein du territoire agricole. Ceci pose la question de la gestion collective d'une ressource privée (i.e. le gène de résistance) et des conditions pour sa réalisation. Si l'organisation spatiale explicite d'un territoire agricole, c'est-à-dire le choix préalable de la variété et de l'itinéraire technique qui lui est appliqué, semble difficilement réalisable, des recommandations peuvent cependant être émises pour favoriser l'utilisation durable des variétés. Selon les systèmes de culture présents, cette étude a montré que la combinaison d'une connaissance précise des pratiques à une échelle fine (500 mètres) et d'une description moins détaillée à l'échelle du territoire permettait d'informer sur la durabilité des résistances. Le choix de la culture du colza, voire de la variété et de son itinéraire technique, pourrait ainsi être réalisé par l'agriculteur en fonction des pratiques de ses voisins et de l'évaluation du risque lié aux parcelles de colza infectées dans l'environnement proche de la parcelle considérée. Ceci requiert cependant une certaine flexibilité dans l'organisation spatiale des systèmes de culture au sein de l'exploitation agricole, qui sera d'autant plus complexe si le colza est une culture centrale et que le parcellaire est morcelé (multiples voisins). Pour évaluer cette flexibilité et la possible mise en œuvre de ces leviers, y compris spatiaux, il pourrait être utile d'intégrer explicitement, via un couplage de modèles par exemple, les règles de décision des agriculteurs. Il serait également nécessaire d'évaluer la faisabilité économique de telles stratégies à l'échelle de l'exploitation agricole, mais également pour les autres porteurs d'enjeux locaux (impacts sur la collecte pour les OS en cas de diminution des surfaces par exemple).

Ce type de démarche, combinant construction participative de scénarios et approche modélisatrice, pourrait être utile pour évaluer les possibles adaptations des pratiques agricoles, en lien avec des thématiques spatiales, mais aussi au vu du changement climatique. La méthode de construction et d'évaluation des scénarios a été appliquée dans cette étude à la gestion du phoma du colza et des résistances, mais pourrait être utilisée pour la gestion d'autres thématiques impliquant des processus spatialisés. En permettant aux acteurs locaux de s'approprier les méthodes de contrôle et d'identifier

de possibles adaptations à des changements de contexte et de les évaluer numériquement, la méthode développée dans cette thèse pourrait ainsi permettre d'identifier des solutions localement adaptées sur des thématiques variées pour lesquelles une échelle spatiale pluri-parcellaire est requise, comme par exemple pour limiter le ruissellement érosif ou contrôler certains bioagresseurs.

Références

- Agreste Primeur, 2010. Pratiques phytosanitaire du colza en 2006 – Pression phytosanitaire sur le colza. Numéro 237, avril 2010.
- Agreste, 2011. Site internet d'Agreste. [En ligne]. <http://www.agreste.agriculture.gouv.fr> (Consulté le 1^{er} Décembre 2011)
- Alabouvette C, Brunin B, 1970. Recherches sur la maladie du colza due à *Leptosphaeria maculans* (Desm.) Ces. et de Not. Annales de Phytopathologie 2, 463-475.
- Haut du formulaire
- Alcamo, J., 2008a. Introduction: the Case for Scenarios of the Environment, in: Alcamo, J. (ed.), Environmental Futures. The Practice of Environmental Scenario Analysis. Elsevier, Amsterdam, The Netherlands, pp. 1-11.
- Alcamo, J., 2008b. The SAS approach: Combining qualitative and quantitative knowledge in environmental scenarios, in: Alcamo, J. (ed.), Environmental Futures. The Practice of Environmental Scenario Analysis. Elsevier, Amsterdam, The Netherlands, pp. 123-150.
- Alcamo, J., Henrichs, T., 2008. Toward guidelines for environmental scenario analysis, in: Alcamo, J. (ed.), Environmental Futures. The Practice of Environmental Scenario Analysis. Elsevier, Amsterdam, The Netherlands, pp. 13-35.
- Altieri, M.A., 1999. The ecological role of biodiversity in agroecosystems. Agriculture Ecosystems & Environment 74, 19-31.
- Anderson, J., Clement, J., Crowder, L.V., 1998. Accomodating conflicting interests in forestry - concepts emerging from pluralism. Unasylva 49, 3-10.
- Andrivon, D., Pilet, F., Montarry, J., Hafidi, M., Corbiere, R., Achbani, E.H., Pelle, R., Ellisseche, D., 2007. Adaptation of *Phytophthora infestans* to partial resistance in potato: Evidence from French and Moroccan populations. Phytopathology 97, 338-34
- Aubertot, J.N., Barbier, J.M., Carpentier, A., Gril, J.J., Guichard, L., Lucas, P., Savary, S., Savini, I., Voltz, M., Bonicelli, B., Ruelle, P., Laplana, R., Turpin, N., 2005. Pesticides, agriculture et environnement : réduire l'utilisation des pesticides et en limiter les impacts environnementaux. Synthèse du rapport de l'expertise Pesticides.
- Aubertot, J.N., Pinochet, X., Dore, T., 2004a. The effects of sowing date and nitrogen availability during vegetative stages on *Leptosphaeria maculans* development on winter oilseed rape. Crop Protection 23, 635-645.
- Aubertot, J.N., Pinochet, X., Reau, R., T., D., 2004b. SimCanker: a simulation model for containing phoma stem canker of oilseed rape through cultural practices., 4th International Crop Science Congress. 27th September–1st October 2004, Brisbane, Australia.
- Aubertot, J.N., Salam, M.U., Diggle, A.J., Dakowska, S., Jedryczka, M., 2006a. SimMat, a new dynamic module of Blackleg Sporacle for the prediction of pseudothecial maturation of *L. maculans/L. biglobosa* species complex. Parameterisation and evaluation under Polish conditions. Bulletin OILB/SROP 29, 277-285.
- Aubertot, J.N., Schott, J.J., Penaud, A., Brun, H., Dore, T., 2004c. Methods for sampling and assessment in relation to the spatial pattern of phoma stem canker (*Leptosphaeria maculans*) in oilseed rape. European Journal of Plant Pathology 110, 183-192.

- Aubertot, J.N., West, J.S., Bousset-Vaslin, L., Salam, M.U., Barbetti, M.J., Diggle, A.J., 2006b. Improved resistance management for durable disease control: A case study of phoma stem canker of oilseed rape (*Brassica napus*). *European Journal of Plant Pathology* 114, 91-106.
- Aubry C., Biarnes A., Maxime F., Papy F., 1998. Modélisation de l'organisation technique de la production dans l'exploitation agricole: la constitution de systèmes de culture. *Etudes & Recherches sur les Systèmes Agraires et le Développement* 31:25-43
- Aumann, C.A., 2011. Constructing model credibility in the context of policy appraisal. *Environmental Modelling & Software* 26, 258-265.
- Bacic, I.L.Z., Rossiter, D.G., Bregt, A.K., 2006. Using spatial information to improve collective understanding of shared environmental problems at watershed level. *Landscape and Urban Planning* 77, 54-66.
- Bah, A., Toure, I., Le Page, C., Ickowicz, A., Diop, A.T., 2006. An agent-based model to understand the multiple uses of land and resources around drillings in Sahel. *Mathematical and Computer Modelling* 44, 513-534.
- Baird, R.E., Phillips, D.V., Mullinix, B.G., Alt, P.J., 1999. Relative longevity of *Leptosphaeria maculans* and associated mycobiota on canola debris. *Phytoprotection* 80.
- Barnaud, C., Bousquet, F., Trebuil, G., 2008. Multi-agent simulations to explore rules for rural credit in a highland farming community of Northern Thailand. *Ecological Economics* 66, 615-627.
- Baudry, J., Papy, F., 2001. The role of landscape heterogeneity in the sustainability of cropping systems. In: Nösberger, J., Geiger, H.H., Struik, P.C. (Eds.), *Crop Science-Progress and Prospects*, Cabi Publishing, Oxon, pp. 243-259.
- Beaujouan, V., Durand, P., Ruiz, L., 2001. Modelling the effect of the spatial distribution of agricultural practices on nitrogen fluxes in rural catchments. *Ecological Modelling* 137, 93-105.
- Becu, N., Neef, A., Schreinemachers, P., Sangkapitux, C., 2008. Participatory computer simulation to support collective decision-making: potential and limits of stakeholder involvement. *Land Use Policy* 25, 498-509.
- Bent, A.F., Mackey, D., 2007. Elicitors, effectors, and R genes: The new paradigm and a lifetime supply of questions. *Annual Review of Phytopathology* 45.
- Bergez, J.E., Colbach, N., Crespo, O., Garcia, F., Jeuffroy, M.H., Justes, E., Loyce, C., Munier-Jolain, N., Sadok, W., 2010. Designing crop management systems by simulation. *European Journal of Agronomy* 32, 3-9.
- Barreteau, O., Bousquet, F., Etienne, M., Souchère, V., d'Aquino, P., 2010. La modélisation d'accompagnement : une méthode de recherche participative et adaptative. In : Etienne, M. (coord), *La modélisation d'accompagnement – Une démarche participative en appui au développement durable*, Quae editions, Versailles, France, pp. 21-46.
- Biddulph, J.E., Fitt, B.D.L., Leech, P.K., Welham, S.J., Gladders, P., 1999. Effects of temperature and wetness duration on infection of oilseed rape leaves by ascospores of *Leptosphaeria maculans* (stem canker). *European Journal of Plant Pathology* 105, 769-781.
- Bishop, P., Hines, A., Collins, T., 2007. The current state of scenario development: an overview of techniques. *Foresight* 9(1): 5-25
- Blackstock, K.L., Kelly, G.J., Horsey, B.L., 2007. Developing and applying a framework to evaluate participatory research for sustainability. *Ecological Economics* 60, 726-742.

- Boillot, M., 2008. Evaluation du comportement global de SIPPOM, un modèle de simulation du risque du phoma du colza, à l'aide de données d'une petite région de production. Mémoire de fin d'étude pour le diplôme d'ingénieur agronome AgroParisTech, 41 p.
- Bokor, A., Barbetti, M.J., Brown, A.G.P., Mac Nish, G.C., P.McR, W., 1975. Blackleg of Rapeseed. *Journal of Agriculture, Western Australia* 16, 7-10.
- Borjeson, L., Hojer, M., Dreborg, K.H., Ekvall, T., Finnveden, G., 2006. Scenario types and techniques: Towards a user's guide. *Futures* 38, 723-739.
- Bosch, F.v.d., Gilligan, C.A., 2003. Measures of durability of resistance. *Phytopathology* 93, 616-625.
- Bouvier, A., Kieu, K., Adamczyk, K., Monod, H., 2009. Computation of the integrated flow of particles between polygons. *Environmental Modelling & Software* 24, 843-849.
- Bowler, I.R., 1986. Intensification. Concentration and specialization in agriculture The case of the European community *Geography* 71, 14-24.
- Bradfield, R., Wright, G., Burt, G., Cairns, G., Van Der Heijden, K., 2005. The origins and evolution of scenario techniques in long range business planning. *Futures* 37.
- Brandenburg, A.M., Carrol, M.S., Blatner, K.A., 1995. Towards successful forest planning through local based qualitative sociology. *West. J. Appl. For.* 10, 95-99.
- Brewer, G. D., 1986. Methods for synthesis: policy exercises. Sustainable development of the biosphere. In: Clark, W.C., Munn, R.E. (Eds.), IIASA. Cambridge University Press, Laxenburg, Austria, pp. 455-473.
- Brisson, N., Levrault, F., éditeurs. 2010. Changement climatique, agriculture et forêt en France : simulations d'impacts sur les principales espèces. Document synthétique du Livre Vert du projet CLIMATOR (2007-2010). ADEME. 20 p.
- Brun, H., Chevre, A.M., Fitt, B.D.L., Powers, S., Besnard, A.L., Ermel, M., Huteau, V., Marquer, B., Eber, F., Renard, M., Andrivon, D., 2010. Quantitative resistance increases the durability of qualitative resistance to *Leptosphaeria maculans* in *Brassica napus*. *New Phytologist* 185, 285-299.
- Brun, H., Levivier, S., Somda, I., Ruer, D., Renard, M., Chevre, A.M., 2000. A field method for evaluating the potential durability of new resistance sources: Application to the *Leptosphaeria maculans* *Brassica napus* pathosystem. *Phytopathology* 90.
- Brunin, B., Lacoste, L., 1970. Recherches sur la maladie due Colza due a *Leptosphaeria maculans* (Desm.) Ces et de Not. II Pouvoir pathogene des ascospores. *Annales Phytopathologie* 2: 477-488.
- Burdon, J.J., 1993. The structure of pathogen populations in natural plant communities. *Annual Review of Phytopathology* 31, 305-323.
- Burel, F., Baudry, J. 1999. *Ecologie du paysage: concepts, méthodes et applications*, Lavoisier, Paris
- Burel, F., Baudry, J., 2005. Habitat quality and connectivity in agricultural landscapes: The role of land use systems at various scales in time. *Ecological Indicators* 5, 305-313.
- Butault, J.P., Dedryver, C.A., Gary, C., Guichard, L., Jacquet, F., Meynard, J.M., Nicot, P., Pitrat, M., Reau, R., Sauphanor, B., Savini, I., Volay, T., 2010. *Ecophyto R&D. Quelles voies pour réduire l'usage des pesticides ? Synthèse du rapport d'étude*, INRA Editeur (France), 90 p.
- Byrne, P.F., Fromherz, S., 2003. Can GM and non-GM crops coexist? Setting a precedent in Boulder County, Colorado, USA. *Journal of Food, Agriculture & Environment* 1.

- Caffarra, A., Rinaldi, M., Eccel, E., Rossi, V., Pertot, I., 2012. Modelling the impact of climate change on the interaction between grapevine and its pests and pathogens: European grapevine moth and powdery mildew. *Agriculture Ecosystems & Environment* 148, 89-101.
- Caminiti, J.E., 2004. Catchment modelling - a resource manager's perspective. *Environmental Modelling & Software* 19, 991-997.
- Castellazzi, M.S., Matthews, J., Angevin, F., Sausse, C., Wood, G.A., Burgess, P.J., Brown, I., Conrad, K.F., Perry, J.N., 2010. Simulation scenarios of spatio-temporal arrangement of crops at the landscape scale. *Environmental Modelling & Software* 25, 1881-1889.
- Caubel, J., Launay, M., Lannou, C., Brisson, N., 2012. Generic response functions to simulate climate-based processes in models for the development of airborne fungal crop pathogens. *Ecological Modelling* 242.
- Cerf, M., Meynard, J.M., 2006. Diversité d'usages des outils d'aide à la décision en conduite de cultures : quels enseignements pour une création conjointe des outils et de leurs usages ? *Natures, Sciences, Sociétés*, 14.
- Champeaux, C., 2006. Recours à l'utilisation de pesticides en grandes cultures: évolution de l'indicateurs de fréquence de traitements au travers des enquêtes «pratiques culturales » du SCEES entre 1994 et 2001. Rapport INRA-Ministère de l'agriculture et de la pêche.
- Chermack, T.J., Lynham, S.A., van der Merwe, L., 2006. Exploring the relationship between scenario planning and perceptions of learning organization characteristics. *Futures* 38.
- Chevre, A.M., Barret, P., Eber, F., Dupuy, P., Brun, H., Tanguy, X., Renard, M., 1997. Selection of stable Brassica napus B-junceae recombinant lines resistant to blackleg (*Leptosphaeria maculans*) .1. Identification of molecular markers, chromosomal and genomic origin of the introgression. *Theoretical and Applied Genetics* 95.
- Claessens, L., Schoorl, J.M., Verburg, P.H., Geraedts, L., Veldkamp, A., 2009. Modelling interactions and feedback mechanisms between land use change and landscape processes. *Agriculture Ecosystems & Environment* 129, 157-170.
- Clavel, L., 2010. Développement d'une méthode de construction et d'évaluation de scénarios portant sur la distribution de systèmes de culture de grands territoires. Application à la demande en eau d'irrigation dans le système Neste. Mémoire pour l'obtention du diplôme de docteur de l'Université de Toulouse, 166 p.
- Clavel, L., Charron, M.-H., Therond, O., Leenhardt, D., 2012. A Modelling Solution for Developing and Evaluating Agricultural Land-Use Scenarios in Water Scarcity Contexts. *Water Resources Management* 26.
- Clavel, L., Soudais, J., Baudet, D., Leenhardt, D., 2011. Integrating expert knowledge and quantitative information for mapping cropping systems. *Land Use Policy* 28, 57-65.
- Colbach, N., 2009. How to model and simulate the effects of cropping systems on population dynamics and gene flow at the landscape level: example of oilseed rape volunteers and their role for co-existence of GM and non-GM crops. *Environmental Science and Pollution Research* 16, 348-360.
- Colbach, N., 2010. Modelling cropping system effects on crop pest dynamics: How to compromise between process analysis and decision aid. *Plant Science* 179(1-2), 1-13.

- Colbach, N., Devaux, C., Angevin, F., 2009a. Comparative study of the efficiency of buffer zones and harvest discarding on gene flow containment in oilseed rape. A modelling approach. *European Journal of Agronomy* 30, 187-198.
- Colbach, N., Kurstjens, D.A.G., Munier-Jolain, N.M., Dalbies, A., Dore, T., 2010. Assessing non-chemical weeding strategies through mechanistic modelling of blackgrass (*Alopecurus myosuroides* Huds.) dynamics. *European Journal of Agronomy* 32, 205-218.
- Colbach, N., Molinari, N., Clermont-Dauphin, C., 2004. Sensitivity analyses for a model simulating demography and genotype evolutions with time application to GENESYS modelling gene flow between rape seed varieties and volunteers. *Ecological Modelling* 179, 91-113.
- Colbach, N., Molinari, N., Meynard, J.M., Messean, A., 2005. Spatial aspects of gene flow between rapeseed varieties and volunteers. *Agronomy for Sustainable Development* 25, 355-368.
- Colbach, N., Monod, H., Lavigne, C., 2009b. A simulation study of the medium-term effects of field patterns on cross-pollination rates in oilseed rape (*Brassica napus* L.). *Ecological Modelling* 220, 662-672.
- Coleno, F.C., 2008. Simulation and evaluation of GM and non-GM segregation management strategies among European grain merchants. *Journal of Food Engineering* 88, 306-314.
- Coleno, F.C., Angevin, F., Lecroart, B., 2009. A model to evaluate the consequences of GM and non-GM segregation scenarios on GM crop placement in the landscape and cross-pollination risk management. *Agricultural Systems* 101, 49-56.
- Coleno, F.C., Duru, M., Theau, J.P., 2005. A method to analyse decision-making processes for land use management in livestock farming. *Int J Agric Sustain* 3(1), 69-78
- Cornwell, L., 2004. Future Planning: Banff National Park, in: van den Belt, M. (ed.), *Mediated Modeling. A System Dynamics Approach to Environmental Consensus Building*. Island Press, Washington D.C., U.S.A, pp. 164-186.
- Covadis, 2009. Standard de données Covadis, Registre Parcellaire Graphique non anonymisé. Ministère de l'Alimentation, de l'Agriculture et de la Pêche.
- Debaeke, P., Munier-Jolain, N., Bertrand, M., Guichard, L., Nolot, J.M., Faloya, V., Saulas, P., 2009. Iterative design and evaluation of rule-based cropping systems: methodology and case studies. A review. *Agronomy for Sustainable Development* 29, 73-86.
- Darwin C., Wallace A.R., 1858. On the tendency of species to form varieties, and on the perpetuation of varieties by natural means of selection. *Journal of Proceedings of the Linnean Society of London (Zoology)* 3, 1-62.
- Daverdin G., 2011. Évolution moléculaire sous pression de sélection et implication dans la reconnaissance AvrLm3/Rlm3 du gène d'avirulence AvrLm4-7 chez *Leptosphaeria maculans*. Thèse de l'université Paris-Sud XI, Orsay, France.
- DDT Oise, Website of DDT Oise. [En ligne]. http://cartelie.application.developpement-durable.gouv.fr/cartelie/voir.do?carte=organisation_caracteristiques_physiques_espaces_agricoles_3&service=DDT_60 (Consulté le 25 mai 2012)
- Deadman, M.L., 2006. Epidemiological consequences of plant disease resistance. In: Cooke, B.M., Jones, D.G., Kaye, B. (Eds.), *The epidemiology of plant diseases*, Dordrecht, Springer, pp 139-157.

- Dejoux, J.F., Meynard, J.M., Reau, R., Roche, R., Saulas, P., 2003. Evaluation of environmentally-friendly crop management systems based on very early sowing dates for winter oilseed rape in France. *Agronomie* 23, 725-736.
- Delourme, R., Brun, H., Ermel, M., Lucas, M.O., Vallee, P., Domin, C., Walton, G., Li, H., Sivasithamparam, K., Barbetti, M.J., 2008. Expression of resistance to *Leptosphaeria maculans* in *Brassica napus* double haploid lines in France and Australia is influenced by location. *Annals of Applied Biology* 153.
- Delourme, R., Chevre, A.M., Brun, H., Rouxel, T., Balesdent, M.H., Dias, J.S., Salisbury, P., Renard, M., Rimmer, S.R., 2006. Major gene and polygenic resistance to *Leptosphaeria maculans* in oilseed rape (*Brassica napus*). *European Journal of Plant Pathology* 114, 41-52.
- Diggle, A.J., Salam, M.U., Thomas, G.J., Yang, H.A., O'Connell, M., Sweetingham, M.W., 2002. AnthracnoseTracer: A spatiotemporal model for simulating the spread of anthracnose in a lupin field. *Phytopathology* 92, 1110-1121.
- Dockerty, T., Lovett, A., Appleton, K., Bone, A., Sunnenberg, G., 2006. Developing scenarios and visualisations to illustrate potential policy and climatic influences on future agricultural landscapes. *Agriculture, Ecosystems & Environment* 114, 103-120.
- Dogliotti, S., Rossing, W.A.H., van Ittersum, M.K., 2003. ROTAT, a tool for systematically generating crop rotations. *European Journal of Agronomy* 19, 239-250.
- Dore, T., Clermont-Dauphin, C., Crozat, Y., David, C., Jeuffroy, M.-H., Loyce, C., Makowski, D., Malezieux, E., Meynard, J.-M., Valantin-Morison, M., 2008. Methodological progress in on-farm regional agronomic diagnosis. A review. *Agronomy for Sustainable Development* 28, 151-161.
- Dore, T., Sebillotte, M., Meynard, J.M., 1997. A diagnostic method for assessing regional variations in crop yield. *Agricultural Systems* 54, 169-188.
- Dougill, A.J., Fraser, E.D.G., Holden, J., Hubacek, K., Prell, C., Reed, M.S., Stagl, S., Stringer, L.C., 2006. Learning from doing participatory rural research: Lessons from the Peak District National Park. *Journal of Agricultural Economics* 57, 259-275.
- Dumanski, J., Pettapiece, W.W., McGregor, R.J., 1998. Relevance of scale dependent approaches for integrating biophysical and socio-economic information and development of agroecological indicators. *Nutrient Cycling in Agroecosystems* 50.
- Dunning, J.B., Stewart, D.J., Danielson, B.J., Noon, B.R., Root, T.L., Lamberson, R.H., Stevens, E.E., 1995. SPATIALLY EXPLICIT POPULATION-MODELS - CURRENT FORMS AND FUTURE USES. *Ecological Applications* 5, 3-11.
- Dury, J., Schaller, N., Garcia, F., Reynaud, A., Bergez, J.E., 2012. Models to support cropping plan and crop rotation decisions. A review. *Agronomy for Sustainable Development* 32, 567-580.
- Eden, C., Ackermann, F., 1996. "Horses for courses": A stakeholder approach to the evaluation of GDSSs. *Group Decision and Negotiation* 5.
- El Titi, A., Boller, E.F., Gendrier, J.P., 1993. Production intégrée : principes et directives techniques. *Bull OILB/SROP*, 16, 1-96.
- Engi, D., Glicken, J., 1995. The Vital Issues Process: Strategic Planning for a Changing World, World SAND95-0845 May 1995. Sandia National Laboratories, Albuquerque, NM.
- Ericson, J.A., 2006. A participatory approach to conservation in the Calakmul Biosphere Reserve, Campeche, Mexico. *Landscape and Urban Planning* 74, 242-266.

- Etienne, M., Du Toit, D.R., Pollard, S., 2011. ARDI: A Co-construction Method for Participatory Modeling in Natural Resources Management. *Ecology and Society* 16.
- European Environmental Agency (EEA), 2001. Participatory Integrated Assessment methods: an assessment of their usefulness for the European Environmental Agency. Technical Report 64, Copenhagen.
- Evans, N., Baierl, A., Semenov, M.A., Gladders, P., Fitt, B.D.L., 2008. Range and severity of a plant disease increased by global warming. *Journal of the Royal Society Interface* 5.
- Evans T.A., Miller L.C., Vasilas B.L., Taylor L.W., Mulrooney R.P., 2007. Management of *Xiphinema americanum* and Soybean Severe Stunt in Soybean using Crop Rotation. *Plant Disease* 91, 216-219.
- Ewert, F., Rounsevell, M.D.A., Reginster, I., Metzger, M.J., Leemans, R., 2005. Future scenarios of European agricultural land use. I. Estimating changes in crop productivity. *Agriculture, Ecosystems & Environment* 107, 101-116.
- Fabre, F., Rousseau, E., Mailleret, L., Moury, B., 2012. Durable strategies to deploy plant resistance in agricultural landscapes. *New Phytologist* 193, 1064-1075.
- Fagerstrom, M.H.H., Messing, I., Wen, Z.M., 2003a. A participatory approach for integrated conservation planning in a small catchment in Loess Plateau, China: Part I. Approach and methods. *Catena* 54, 255-269.
- Fagerstrom, M.H.H., Messing, I., Wen, Z.M., Trouwborst, K.O., Xu, M.X., Zang, X.P., Olsson, C., Andersson, C., 2003b. A participatory approach for integrated conservation planning in a small catchment in Loess Plateau, China: Part II. Analysis and findings. *Catena* 54, 271-288.
- Fargue-Lelievre, A., Moraine, M., Coleno, F.C., 2011. Farm typology to manage sustainable blackleg resistance in oilseed rape. *Agronomy for Sustainable Development* 31, 733-743.
- Ferron, P., Deguine, J.P., 2005. Vers une conception agroécologique de la protection des cultures. In Regnault-Roger, C. (Ed), *Enjeux phytosanitaires pour l'agriculture et l'environnement*. Lavoisier Tec. And Doc., Paris, pp 347-366.
- Finckh, M.R., Wolfe, M.S., 1998. Diversification strategies. In: Jones D.G. (Ed), *The epidemiology of plant diseases*. Kluwer Publishers, Dordrecht, pp. 231-259.
- Finckh, M.R., Gacek, E.S., Goyeau, H., Lannou, C., Merz, U., Mundt, C.C., Munk, L., Nadziak, J., Newton, A.C., de Vallavieille-Pope, C., Wolfe, M.S., 2000. Cereal variety and species mixtures in practice, with emphasis on disease resistance. *Agronomie* 20, 813-837.
- Fitt, B.D.L., Brun, H., Barbetti, M.J., Rimmer, S.R., 2006. World-wide importance of phoma stem canker (*Leptosphaeria maculans* and *L-Biglobosa*) on oilseed rape (*Brassica napus*). *European Journal of Plant Pathology* 114, 3-15.
- Flor, H.H., 1971. Current status of the gene-for-gene concept. *Annual Review of Phytopathology* 9, 275-296.
- Foley, J.A., DeFries, R., Asner, G.P., Barford, C., Bonan, G., Carpenter, S.R., Chapin, F.S., Coe, M.T., Daily, G.C., Gibbs, H.K., Helkowski, J.H., Holloway, T., Howard, E.A., Kucharik, C.J., Monfreda, C., Patz, J.A., Prentice, I.C., Ramankutty, N., Snyder, P.K., 2005. Global consequences of land use. *Science* 309, 570-574.
- Fox, J., Weisberg, S., 2011. *An R Companion to Applied Regression*, Second Edition, Sage, 2011.

- Gabrielson, R.L., 1983. Blackleg disease of crucifers caused by *Leptosphaeria maculans* (Phoma Lingam) and its control. *Science and Technology* 11, 749-780.
- Gibbons, J.M., Ramsden, S.J., 2008. Integrated modelling of farm adaptation to climate change in East Anglia, UK: Scaling and farmer decision making. *Agriculture Ecosystems & Environment* 127, 126-134.
- Gidley, J.M., Fien, J., Smith, J.A., Thomsen, D.C., Smith, T.F., 2009. Participatory futures methods: towards adaptability and resilience in climate-vulnerable communities. *Environmental Policy and Governance* 19.
- Gilligan, C.A., Truscott, J.E., Stacey, A.J., 2007. Impact of scale on the effectiveness of disease control strategies for epidemics with cryptic infection in a dynamical landscape: an example for a crop disease. *Journal of the Royal Society Interface* 4, 925-934.
- Gladders, P., Evans, N., Marcroft, S., Pinochet, X., 2006. Dissemination of information about management strategies and changes in farming practices for the exploitation of resistance to *Leptosphaeria maculans* (phoma stem canker) in oilseed rape cultivars. *European Journal of Plant Pathology* 114, 117-126.
- Glicken, J., 2000. Getting stakeholder participation "right": a discussion of participatory processes possible pitfalls. *Environmental Science and Policy* 3:305-310
- Godfray, H.C.J., Beddington, J.R., Crute, I.R., Haddad, L., Lawrence, D., Muir, J.F., Pretty, J., Robinson, S., Thomas, S.M., Toulmin, C., 2010. Food Security: The Challenge of Feeding 9 Billion People. *Science* 327, 812-818.
- Goffaux, R., Goldringer, I., Bonneuil, C., Montalent, P., Bonnin, I., 2011. Quels indicateurs pour suivre la diversité génétique des plantes cultivées ? Le cas du blé tendre cultivé en France depuis un siècle. Rapport FRB, Série Expertise et synthèse, 2011, 44 pages.
- Greeuw S.C.H., van Asselt, M.B.A, Grosskurth, J., Storms, C.A.M.H., Rijkens-Klomp, N., Rothman, D.S., Rotmans, J., 2000. *Cloudy Crystal Balls: An assessment of recent European and global scenario studies and models*. Copenhagen: European Environment Agency.
- Grimble, R., Wellard, K., 1997. Stakeholder methodologies in natural resource management: A review of principles, contexts, experiences and opportunities. *Agricultural Systems* 55.
- Hall, R., 1992. Epidemiology of Blackleg of oilseed rape. *Canadian Journal of Plant Pathology-Revue Canadienne De Phytopathologie* 14, 46-55.
- Hammond, K.E., Lewis, B.G., 1986. The timing and sequence of events leading to stem canker disease in populations of *Brassica-Napus* var *Oleifera* in the field. *Plant Pathology* 35, 551-564.
- Hammond, K.E., Lewis, B.G., Musa, T.M., 1985. A Systemic pathway in the infection of oilseed rape plants by *Leptosphaeria maculans*. *Plant Pathology* 34, 557-565.
- Hannachi, M., 2011. La coopération au service du bien commun. Les stratégies des Entreprises de Collecte et de Stockage de céréales face aux OGM. Mémoire pour l'obtention du diplôme de docteur de l'Université de Versailles Saint-Quentin, 302 p.
- Hanski, I., 1998. Metapopulation dynamics. *Nature* 396, 41-49.
- Hare, M.P., Barreteau, O., Beck, M.B., Cogen, V., Mostert, E., Letcher, C., Pahl-Wostl, R., Ridder, D., Tabara, J.D., 2006. Methods for stakeholder participation in water management, in: Giupponi, C., Jakeman, A., Karssenberg, D., Hare, M. (eds.), *Management of Water Resources: an Integrated Approach*. Edward Elar Publishing Company, p. 361.

- Harrison, B.D., 2002. Virus variation in relation to resistance-breaking in plants. *Euphytica* 124, 181-192.
- Hattermann, F.F., Weiland, M., Huang, S.C., Krysanova, V., Kundzewicz, Z.W., 2011. Model-Supported Impact Assessment for the Water Sector in Central Germany Under Climate Change-A Case Study. *Water Resources Management* 25, 3113-3134.
- Hau B, de Valavieille-Pope C (2006) Wind-dispersed diseases. In : Cooke, B.M., Jones, D.G., Kaye B. Eds), *The Epidemiology of Plant Diseases*. Springer, Dordrecht, The Netherlands, pp 387-416.
- van Ittersum, M.K., 2003. Formalizing agro-ecological engineering for future-oriented land use studies. *European Journal of Agronomy* 19, 549-562.
- Henry, J.P., Gouyon, P.H., 1999. *Précis de génétique des populations*. Dunod, Paris. 180 p.
- Hijmans, R.J., van Ittersum, M.K., 1996. Aggregation of spatial units in linear programming models to explore land use options. *Netherlands Journal of Agricultural Science* 44, 145-162.
- Horrigan, L., Lawrence, R.S., Walker, P., 2002. How sustainable agriculture can address the environmental and human health harms of industrial agriculture. *Environmental Health Perspectives* 110, 445-456.
- Hossard, L., Lannou, C., Papaix, J., Monod, H., Lô-Pelzer, E., Souchère, V., Jeuffroy, M.H., 2011. Quel déploiement spatio-temporel des variétés et des itinéraires techniques pour accroître la durabilité des résistances variétales ? *Innovations Agronomiques* 8, 15-33
- Houet, T., Loveland, T.R., Hubert-Moy, L., Gaucherel, C., Napton, D., Barnes, C.A., Saylor, K., 2010. Exploring subtle land use and land cover changes: a framework for future landscape studies. *Landscape Ecology* 25, 249-266.
- Huang, Y.-J., Balesdent, M.-H., Li, Z.-Q., Evans, N., Rouxel, T., Fitt, B.D.L., 2010. Fitness cost of virulence differs between the AvrLm1 and AvrLm4 loci in *Leptosphaeria maculans* (phoma stem canker of oilseed rape). *European Journal of Plant Pathology* 126.
- Huang, Y.J., Evans, N., Li, Z.Q., Eckert, M., Chevre, A.M., Renard, M., Fitt, B.D.L., 2006. Temperature and leaf wetness duration affect phenotypic expression of Rlm6-mediated resistance to *Leptosphaeria maculans* in *Brassica napus*. *New Phytologist* 170, 129-141.
- Huang, Y.J., Li, Z.Q., Evans, N., Rouxel, T., Fitt, B.D.L., Balesdent, M.H., 2004. Fitness cost associated with loss of the AvrLm4 avirulence function in *Leptosphaeria maculans* (Phoma stem canker of oilseed rape), Workshop on Phoma Stem Canker Durable Resistance, Versailles, FRANCE, pp. 77-89.
- Huang Y.J., Li Z.Q., Evans N., Rouxel T., Fitt B.D.L., Balesdent M.H., 2006. Fitness cost associated with loss of the AvrLm4 avirulence function in *Leptosphaeria maculans* (phoma stem canker of oilseed rape). *European Journal of Plant Pathology* 114, 77-89.
- Huang, Y.J., Pirie, E.J., Evans, N., Delourme, R., King, G.J., Fitt, B.D.L., 2009. Quantitative resistance to symptomless growth of *Leptosphaeria maculans* (phoma stem canker) in *Brassica napus* (oilseed rape). *Plant Pathology* 58, 314-323.
- IOBC / OILB, Statutes. IOBC wprs Bull./OILB srop Bull. 1973/1 (1973).
- IPCC, 2007. In: Solomon, S., et al. (Eds.), *Climate Change 2007: Synthesis Report*. Cambridge University Press, Cambridge.
- Janssen, S., Ewert, F., Li, H., Athanasiadis, I.N., Wien, J.J.F., Therond, O., Knapen, M.J.R., Bezlepkina, I., Alkan-Olsson, J., Rizzoli, A.E., Belhouchette, H., Svensson, M., van Ittersum, M.K.,

2009. Defining assessment projects and scenarios for policy support: Use of ontology in Integrated Assessment and Modelling. *Environmental Modelling & Software* 24, 1491-1500.
- Janssen, S., van Ittersum, M.K., 2007. Assessing farm innovations and responses to policies: A review of bio-economic farm models. *Agricultural Systems* 94.
- Jeuffroy, M.H., Valantin-Morison, M., Saulas, L., Champolivier, L., 2003. Azodyn-Rape: a simple model for decision support in rapeseed nitrogen fertilisation. Proceedings of the 11th International Rapeseed Congress, Copenhagen, Denmark.
- Joannon, A., Souchere, V., Martin, P., Papy, F., 2006. Reducing runoff by managing crop location at the catchment level, considering agronomic constraints at farm level. *Land Degradation & Development* 17, 467-478.
- Johnson, R., 1981. Durable resistance Definition of genetic control and attainment in plant breeding. *Phytopathology* 71, 567-568.
- Johnson, R., 1984. A CRITICAL ANALYSIS OF DURABLE RESISTANCE. *Annual Review of Phytopathology* 22, 309-330.
- Joss, S., Durant, J., Eds., 1995. Public participation in science: the role of consensus conferences in Europe. Trustees of the Science Museum, London.
- Keesing, F., Holt, R. D., Ostfeld, R.S., 2006. Effects of species diversity on disease risk. *Ecology Letters* 9, 485-498.
- Kiyosawa S., 1982. Genetics and epidemiological modeling of breakdown of plant disease resistance. *Annual Review of Phytopathology* 20 93-117.
- Kemp-Benedict, E., 2004. From narrative to number: a role for quantitative models in scenario analysis, in: Pahl-Wostl, C., Schmidt, S., Rizzoli, A.E., Jakeman, S.J. (Eds.), *Complexity and Integrated Resources Management*. Transactions of the 2nd Biennial Meeting of the International Environmental Modelling and Software Society, Manno, Switzerland.
- Kok, K., Patel, M., Rothman, D.S., Quaranta, G., 2006. Multi-scale narratives from an IA perspective: Part II. Participatory local scenario development. *Futures* 38, 285-311.
- Kok, K., van Delden, H., 2009. Combining two approaches of integrated scenario development to combat desertification in the Guadalentin watershed, Spain. *Environment and Planning B-Planning & Design* 36, 49-66.
- Korfmacher, K.S., 2001. The politics of participation in watershed modeling. *Environmental Management* 27.
- Krupinsky, J.M., Bailey, K.L., McMullen, M.P., Gossen, B.D., Turkington, T.K., 2002. Managing plant disease risk in diversified cropping systems (vol 94, pg 198, 2002). *Agronomy Journal* 94, 955-955.
- Lacoste, L., 1963. Action de la température et de l'éclaircissement sur la reproduction en culture pure de diverses espèces du genre *Leptosphaeria* Ces. et de not. *C. R. Acad. Agric. Fr.* 2668-2671.
- Lamine C., Meynard J.M., Perrot N., Bellon S., 2009. Analyse des formes de transition vers des agricultures plus écologiques : les cas de l'Agriculture Biologique et de la Protection Intégrée. *Innovations Agronomiques* 4 483-493.
- Lancon, J., Wery, J., Rapidel, B., Angokaye, M., Gerardeaux, E., Gaborel, C., Ballo, D., Fadegnon, B., 2007. An improved methodology for integrated crop management systems. *Agronomy for Sustainable Development* 27, 101-110.

- Lautenbach, S., Berlekamp, J., Graf, N., Seppelt, R., Matthies, M., 2009. Scenario analysis and management options for sustainable river basin management: Application of the Elbe DSS. *Environmental Modelling & Software* 24, 26-43.
- Le Bail, M., Lecroart, B., Gauffreteau, A., Angevin, F., Messean, A., 2010. Effect of the structural variables of landscapes on the risks of spatial dissemination between GM and non-GM maize. *European Journal of Agronomy* 33, 12-23.
- Le, Q.B., Park, S.J., Vlek, P.L.G., 2010. Land Use Dynamic Simulator (LUDAS): A multi-agent system model for simulating spatio-temporal dynamics of coupled human-landscape system 2. Scenario-based application for impact assessment of land-use policies. *Ecological Informatics* 5, 203-221.
- Le Ber, F., Lavigne, C., Adamczyk, K., Angevin, F., Colbach, N., Mari, J.F., Monod, H., 2009. Neutral modelling of agricultural landscapes by tessellation methods-Application for gene flow simulation. *Ecological Modelling* 220, 3536-3545.
- Lepoivre, P., 2003. Les mécanismes de résistance et la spécificité parasitaire. In : Lepoivre P. (Ed.), *Phytopathologie*, Bruxelles, De Boeck Université, 161-191.
- Leenhardt, D., Angevin, F., Biarnes, A., Colbach, N., Mignolet, C., 2010. Describing and locating cropping systems on a regional scale. A review. *Agronomy for Sustainable Development* 30, 131-138.
- Leenhardt, D., Therond, O., Cordier, M.O., Gascuel-Oudou, C., Reynaud, A., Durand, P., Bergez, J.E., Clavel, L., Masson, V., Moreau, P., 2012. A generic framework for scenario exercises using models applied to water-resource management. *Environmental Modelling & Software* 37, 125-133.
- Legg, D.E., 2004. The relevance of modelling in successful implementation of IPM. *Integrated pest management: potential, constraints and challenges*, 39-54.
- Leung, H., Nelson, R.J., Leach, J.E., 1993. Population structure of plant pathogenic fungi and bacteria. *Adv. Plant Pathol.* 10, 157-205.
- Levins, R., 1969. Some demographic and genetic consequences of environmental heterogeneity for biological control. *Bull. Entomol. Soc. Am.* 15, 237-240.
- Li, H., Sivasithamparam, K., Barbetti, M., Li, H., 2006a. Evidence supporting the polycyclic nature of blackleg disease (*Leptosphaeria maculans*) of oilseed rape in Australia and implications for disease management. *Brassica* 8, 65-69.
- Li, H., Smyth, F., Barbetti, M.J., Sivasithamparam, K., 2006b. Relationship between Brassica napus seedling and adult plant responses to *Leptosphaeria maculans* is determined by plant growth stage at inoculation and temperature regime. *Field Crops Research* 96, 428-437.
- Li, H.B., Reynolds, J.F., 1994. A Simulation experiment to quantify spatial heterogeneity in categorical maps. *Ecology* 75, 2446-2455.
- Lindhout, P., 2002. The perspectives of polygenic resistance in breeding for durable disease resistance. *Euphytica* 124, 217-226.
- Lippe, M., Minh, T.T., Neef, A., Hilger, T., Hoffmann, V., Lam, N.T., Cadisch, G., 2011. Building on qualitative datasets and participatory processes to simulate land use change in a mountain watershed of Northwest Vietnam. *Environmental Modelling & Software* 26, 1454-1466.
- Lô-Pelzer E., 2008. Modélisation des effets des systèmes de culture et de leur répartition spatiale sur le phoma du colza et l'adaptation des populations pathogènes responsables de la maladie (*Leptosphaeria*

maculans) aux résistances variétales. Mémoire pour l'obtention du diplôme de docteur d'AgroParisTech, 146 p.

Lô-Pelzer, E., Aubertot, J.N., Bousset, L., Salam, M.U., Jeuffroy, M.H., 2008. SIPPOM-WOSR: simulator for integrated pathogen population management for blackleg on canola. ENDURE International Conference 2008, La Grande Motte, France, 12-15 October 2008. [En ligne]. http://www.endure-network.eu/international_conference_2008/proceedings/wednesday_october_15 (Consulté le 7 juin 2012)

Lô-Pelzer, E., Aubertot, J.N., Bousset, L., Salam, M.U., Jeuffroy, M.N., 2010a. SIPPOM-WOSR: A Simulator for Integrated Pathogen POPulation Management of phoma stem canker on Winter Oil Seed Rape II. Sensitivity analysis. *Field Crops Research* 118, 82-93.

Lô-Pelzer, E., Aubertot, J.N., David, O., Jeuffroy, M.H., Bousset, L., 2009. Relationship between severity of blackleg (*Leptosphaeria maculans*/L-biglobosa species complex) and subsequent primary inoculum production on oilseed rape stubble. *Plant Pathology* 58, 61-70.

Lô-Pelzer, E., Bousset, L., Jeuffroy, M.H., Salam, M.U., Pinochet, X., Boillot, M., Aubertot, J.N., 2010b. SIPPOM-WOSR: A Simulator for Integrated Pathogen POPulation Management of phoma stem canker on Winter OilSeed Rape I. Description of the model. *Field Crops Research* 118, 73-81.

Lorenzoni, I., Jordan, A., O'Riordan, T., Turner, R.K., Hulme, M., 2000. A co-evolutionary approach to climate change impact assessment: Part II. A scenario-based case study in East Anglia (UK). *Global Environmental Change-Human and Policy Dimensions* 10, 145-155.

Loyce, C., Meynard, J.M., Bouchard, C., Rolland, B., Lonnet, P., Bataillon, P., Bernicot, M.H., Bonnefoy, M., Charrier, X., Debote, B., Darnarquet, T., Duperrier, B., Felix, I., Heddadj, D., Leblanc, O., Leleu, M., Mangin, P., Meausoone, M., Doussinault, G., 2008. Interaction between cultivar and crop management effects on winter wheat diseases, lodging, and yield. *Crop Protection* 27, 1131-1142.

Loyce, C., Rolland, B., Bernicot, M.H., Bouchard, C., Doussinault, G., Hasle, H., Meynard, J.M., 2001. Les variétés de blé tolérantes aux maladies : une innovation majeure à valoriser par des itinéraires techniques économes. *Perspectives agricoles* 268, 50-56.

Loyce, C., Wéry, J., 2006. Les outils des agronomes pour l'évaluation et la conception des systèmes de culture, In: Doré T., Le Bail, M., Martin, P., Ney, B., Roger-Estrade, J. (Eds.), *L'agronomie aujourd'hui*. QUAE Editions, 77-95.

Luz, F., 2000. Participatory landscape ecology - A basis for acceptance and implementation. *Landscape and Urban Planning* 50, 157-166.

Lynam, T., de Jong, W., Sheil, D., Kusumanto, T., Evans, K., 2007. A review of tools for incorporating community knowledge, preferences, and values into decision making in natural resources management. *Ecology and Society* 12.

Maack, J., 2001. Scenario analysis: a tool for task managers. In: *Social Analysis: Selected Tools and Techniques*. Social Development Paper No. 36. World Bank Available from the Social Development Department, The World Bank, Washington, D.C.

Magarey, R.D., Sutton, T.B., Thayer, C.L., 2005. A simple generic infection model for foliar fungal plant pathogens. *Phytopathology* 95, 92-100.

Mahmoud, M., Liu, Y., Hartmann, H., Stewart, S., Wagener, T., Semmens, D., Stewart, R., Gupta, H., Dominguez, D., Dominguez, F., Hulse, D., Letcher, R., Rashleigh, B., Smith, C., Street, R., Ticehurst, J., Twery, M., van Delden, H., Waldick, R., White, D., Winter, L., 2009. A formal framework for

- scenario development in support of environmental decision-making. *Environmental Modelling & Software* 24, 798-808.
- Mahmoud, M.I., Gupta, H.V., Rajagopal, S., 2011. Scenario development for water resources planning and watershed management: Methodology and semi-arid region case study. *Environmental Modelling & Software* 26, 873-885.
- Malézieux, E., Trébuil, G., Jaeger, M., 2001. Modéliser les agroécosystèmes. In: *Modélisation des agroécosystèmes et aide à la décision*. CIRAD-INRA, 17–33.
- Mann, C.C., 1999. Crop scientists seek a new revolution. *Science* 283, 310-314.
- Marcroft, S.J., Sprague, S.J., Pymer, S.J., Salisbury, P.A., Howlett, B.J., 2004. Crop isolation, not extended rotation length, reduces blackleg (*Leptosphaeria maculans*) severity of canola (*Brassica napus*) in south-eastern Australia. *Australian Journal of Experimental Agriculture* 44, 601-606.
- Margosian, M.L., Garrett, K.A., Hutchinson, J.M.S., With, K.A., 2009. Connectivity of the American Agricultural Landscape: Assessing the National Risk of Crop Pest and Disease Spread. *Bioscience* 59, 141-151.
- Markopoulos, M., Broekhoven, G., Fisher, Bob. 2012. Collaboration and multi-stakeholder dialogue. IUCN, Mars 2012.
- Marquard, R., Walker, K.C., 1995. Environmental impact of rapeseed production. In *production and utilization of Brassica oilseeds*. In Kimber, D.S. and McGregor, D.I. (Eds), *Production and utilization of Brassica oilseeds*. CAB International, Oxford, 195-213.
- Martin, G., 2009. Analyse et conception de systèmes fourragers flexible par modélisation systémique et simulation dynamique. Mémoire pour l'obtention du diplôme de docteur de l'Université de Toulouse, 179 p.
- Maton, L., Leenhardt, D., Bergez, J.E., 2007. Geo-referenced indicators of maize sowing and cultivar choice for better water management. *Agronomy for Sustainable Development*, 27(4), 377-386.
- Matson, P.A., Parton, W.J., Power, A.G., Swift, M.J., 1997. Agricultural intensification and ecosystem properties. *Science* 277, 504-509.
- McDonald, B.A., Linde, C., 2002. Pathogen population genetics, evolutionary potential, and durable resistance. *Annual Review of Phytopathology* 40, 349-379.
- McGee, DC, 1977. Black leg (*Leptosphaeria maculans* (Desm.) Ces. et de Not.) of rapeseed in Victoria: sources of infection and relationships between inoculum, environmental factors and disease severity. *Australian Journal of Agricultural Research* 28, 53-62.
- McGee, D.C., Emmet, R.W., 1977. Blackleg (*Leptosphaeria maculans* (Desm.) Ces. et de Not.) of rapeseed in Victoria: crop losses and factors which affect disease severity. *Australian Journal of Agricultural Research* 28, 47-51.
- Meehan, T.D., Werling, B.P., Landis, D.A., Gratton, C., 2011. Agricultural landscape simplification and insecticide use in the Midwestern United States. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America* 108, 11500-11505.
- Melman, T.C.P., Schotman, A.G.M., Hunink, S., de Snoo, G.R., 2008. Evaluation of meadow bird management, especially black-tailed godwit (*Limosa limosa* L.), in the Netherlands. *Journal for Nature Conservation* 16.
- Meyer-Aurich, A., 2005. Economic and environmental analysis of sustainable farming practices - a Bavarian case study. *Agricultural Systems* 86, 190-206.

- Meynard, J.M., Dore, T., Lucas, P., 2003. Agronomic approach: cropping systems and plant diseases. *Comptes Rendus Biologies* 326, 37-46.
- Mignolet, C., Schott, C., Benoit, M., 2007. Spatial dynamics of farming practices in the Seine basin: Methods for agronomic approaches on a regional scale. *Science of the Total Environment* 375, 13-32.
- Millennium Ecosystem Assessment, *Ecosystems and Human Wellbeing: A Framework for Assessment* (Island Press, Washington, DC, 2003).
- Miraglia, M., Berdal, K.G., Brera, C., Corbisier, P., Holst-Jensen, A., Kok, E.J., Marvin, H.J.P., Schimmel, H., Rentsch, J., van Rie, J., Zagon, J., 2004. Detection and traceability of genetically modified organisms in the food production chain. *Food and Chemical Toxicology* 42, 1157-1180.
- Moilanen, A., Hanski, I., 1998. Metapopulation dynamics: Effects of habitat quality and landscape structure. *Ecology* 79, 2503-2515.
- Molina, J.L., Garcia-Arostegui, J.L., Bromley, J., Benavente, J., 2011. Integrated Assessment of the European WFD Implementation in Extremely Overexploited Aquifers Through Participatory Modelling. *Water Resources Management* 25, 3343-3370.
- Monod, H., Naud, C., Makowski, D., 2006. Uncertainty and sensitivity analysis for crop models, in: Wallach, D., Makowski, D., Jones, J.W. (eds.), *Working with Dynamics Crop Models*. Elsevier, Amsterdam, The Netherlands, pp. 55-99.
- Montarry, J., Cartier, E., Jacquemond, M., Palloix, AL, Moury, B., 2012. Virus adaptation to quantitative plant resistance: erosion or breackdown? *Journal of Evolutionary Biology*, in press.
- Morales Grosskopf, H., Arbeletche, P., Bommel, P., Burges, J. C., Champredonde, M., Corral, J., Tourrand, J. F., 2010. Modéliser le changement dans la gestion des terres de parcours en Uruguay. *Cah Agric* 2010 19(2), 112-117.
- Moreira, F., Beja, P., Morgado, R., Reino, L., Gordinho, L., Delgado, A., Borralho, R., 2005. Effects of field management and landscape context on grassland wintering birds in Southern Portugal. *Agriculture Ecosystems & Environment* 109, 59-74.
- Mueller, J.P., Barbercheck, M.E., Bell, M., Brownie, C., Creamer, N.G., Hitt, A., Hu, S., King, L., Linker, H.M., Louws, F.J., Marlow, S., Marra, M., Raczkowski, C.W., Susko D.J., Waggoner, M.G., 2002. Development and implementation of a long-term agricultural systems study: challenges and opportunities. *Horttechnology* 12, 362-368.
- Mundt, C. C., Brophy, L., 1988. Influence of number of host genotype units on the effectiveness of host mixtures for disease control: a modeling approach. *Phytopathology*, 78, 1087-1094.
- Mundt, C.C., Cowger, C., Garrett, K.A., 2002. Relevance of integrated disease management to resistance durability. *Euphytica* 124, 245-252.
- Nakicenovic, N., Swart, R. (Eds.), 2000. *Emissions Scenarios. A Special Report of Working Group III of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press, Cambridge.
- Nidumolu, U.B., van Keulen, H., Lubbers, M., Mapfumo, A., 2007. Combining Interactive Multiple Goal Linear Programming with an inter-stakeholder communication matrix to generate land use options. *Environmental Modelling & Software* 22, 73-83.
- OILB-SROP, 1973. *Statuts*. Srop 1, 25p.
- Pahl-Wostl, C., 2008. Participation in Building Environmental Scenarios, in: Jakeman, A.J. (ed.), *Environmental Futures. The Practice of Environmental Scenarios Analysis*. Elsevier, Amsterdam, The Netherlands, pp. 105-122.

- Pahl-Wostl, C., Hare, M., 2004. Processes of social learning in integrated resources management. *Journal of Community & Applied Social Psychology* 14, 193-206.
- Palang, H., Alumae, H., Mander, U., 2000. Holistic aspects in landscape development: a scenario approach. *Landscape and Urban Planning* 50, 85-94.
- Palloix A., Ayme V., Moury B., 2009. Durability of plant major resistance genes to pathogens depends on the genetic background, experimental evidence and consequences for breeding strategies. *New Phytologist* 183, 190-199.
- Papaix, J., Goyeau, H., Du Cheyron, P., Monod, H., Lannou, C., 2011. Influence of cultivated landscape composition on variety resistance: an assessment based on wheat leaf rust epidemics. *New Phytologist* 191, 1095-1107.
- Parker, P., Letcher, R., Jakeman, A., Beck, M.B., Harris, G., Argent, R.M., Hare, M., Pahl-Wostl, C., Voinov, A., Janssen, M., Sullivan, P., Scoccimarro, M., Friend, A., Sonnenshein, M., Baker, D., Matejcek, L., Odulaja, D., Deadman, P., Lim, K., Larocque, G., Tarikhi, P., Fletcher, C., Put, A., Maxwell, T., Charles, A., Breeze, H., Nakatani, N., Mudgal, S., Naito, W., Osidele, O., Eriksson, I., Kautsky, U., Kautsky, E., Naeslund, B., Kumlblad, L., Park, R., Maltagliati, S., Girardin, P., Rizzoli, A., Mauriello, D., Hoch, R., Pelletier, D., Reilly, J., Olafsdottir, R., Bin, S., 2002. Progress in integrated assessment and modelling. *Environmental Modelling & Software*, 17, 209-217.
- Parlevliet J.E., 2002. Durability of resistance against fungal, bacterial and viral pathogens; present situation. *Euphytica* 124, 147-156.
- Parnell, S., Gottwald, T.R., van den Bosch, F., Gilligan, C.A., 2009. Optimal Strategies for the Eradication of Asiatic Citrus Canker in Heterogeneous Host Landscapes. *Phytopathology* 99, 1370-1376.
- Patel, M., Kok, K., Rothman, D.S., 2007. Participatory scenario construction in land use analysis: an insight into the experiences created by stakeholder involvement in the Northern Mediterranean. *Land Use Policy* 24, 546-561.
- Pedersen, E.K., Grant, W.E., 2004. Sage Grouse Populations in Southeastern Idaho, U.S.A.: Effect of Sheep Grazing and Fire, in: van den Belt, M. (ed.), *Mediated Modeling. A System Dynamics Approach to Environmental Consensus Building*. Island Press, Washington D.C., U.S.A, pp. 187-204.
- Pelzer E, Fortino G, Bockstaller C et al (2012) Assessing innovative cropping systems with DEXiPM, a qualitative multi-criteria assessment tool derived from DEXi. *Ecological Indicators* 18, 171-182.
- Peterson, T.R., A., K., Grant, W.E., 2004. Using Mediated Modeling to Facilitate Collaborative Learning Among Residents of the San Antonio Watershed, Texas, U.S.A, in: van den Belt, M. (ed.), *Mediated Modeling: a System Dynamics Approach to Environmental Consensus Building*. Island Press, Washington D.C., U.S.A, pp. 136-163.
- Pierre, J. G., Regnault, Y., 1982. Contribution à la mise au point d'une méthode de plein champ destinée à mesurer la sensibilité des variétés de colza au phoma. *Informations Techniques CETIOM* 81, 3-18.
- Pietravalle, S., Lemarie, S., van den Bosch, F., 2006. Durability of resistance and cost of virulence. *European Journal of Plant Pathology* 114, 107-116.
- Pink, D., Puddephat, I., 1999. Deployment of disease resistance genes by plant transformation - a 'mix and match' approach. *Trends in Plant Science* 4, 71-75.
- Pinochet, X., Carpezat, J., Bichot, S., Sauzet, G., Leflon, M., 2012. Evolution des populations de *Leptosphaeria maculans* sur une petite région agricole du Centre à la suite de l'introduction d'hybrides

- de colza portant la résistance spécifique Rlm7. AFPP – 10^{ème} Conférence Internationale sur les Maladies des Plantes. Tours, France, 3-5 décembre 2012.
- Plantegenest, M., Le May, C., Fabre, F., 2007. Landscape epidemiology of plant diseases. *Journal of the Royal Society Interface* 4, 963-972.
- Popper, R., 2008. How are foresight methods selected? *Foresight*, 10(6), 62-89.
- Primdahl, J., 1999. Agricultural landscapes as places of production and for living in owner's versus producer's decision making and the implications for planning. *Landscape and Urban Planning* 46, 143-150.
- Pringle, A., Taylor, J.W., 2002. The fitness of filamentous fungi. *Trends in Microbiology* 10, 474-481.
- R Development Core Team, 2005. R: A language and environment for statistical computing, reference index version 2.2.1. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. ISBN 3-900051-07-0, URL <http://www.R-project.org>.
- Raisen, W. K., 2010. Landscape Epidemiology of Vector-Borne Diseases. *Annu. Rec. Entomol*, 55, 461-483.
- Rasmussen, P.E., Goulding, K.W.T., Brown, J.R., Grace, P.R., Janzen, H.H., Korschens, M., 1998. Agroecosystem - Long-term agroecosystem experiments: Assessing agricultural sustainability and global change. *Science* 282, 893-896.
- Rauschmayer, F., Wittmer, H., 2006. Evaluating deliberative and analytical methods for the resolution of environmental conflicts. *Land Use Policy* 23, 108-122.
- Redman, C., Grove, M. J. and Kuby, L., 2004. Integrating Social Science into the Long Term Ecological Research (LTER) Network: Social Dimensions of Ecological Change and Ecological Dimensions of Social Change. *Ecosystems* 7(2), 161-171.
- Reed, M.S., 2008. Stakeholder participation for environmental management: a literature review. *Biological Conservation* 141, 2417-2431.
- Refsgaard, J.C., van der Sluijs, J.P., Hojberg, A.L., Vanrolleghem, P.A., 2007. Uncertainty in the environmental modelling process - A framework and guidance. *Environmental Modelling & Software* 22, 1543-1556.
- Romera, A.J., Morris, S.T., Hodgson, J., Stirling, W.D., Woodward, S.J.R., 2004. A model for simulating rule-based management of cow-calf systems. *Computers and Electronics in Agriculture* 42, 67-86.
- Ronfort, C., 2010. Elaboration et évaluation environnementale de scénarios prospectifs d'occupation des sols à l'échelle locale : application au cas du ruissellement érosif dans le Pays de Caux, Haute-Normandie. Mémoire pour l'obtention du diplôme de docteur de l'Université de Rouen, 346 p.
- Ronfort, C., Souchere, V., Martin, P., Sebillotte, C., Castellazzi, M.S., Barbottin, A., Meynard, J.M., Laignel, B., 2011. Methodology for land use change scenario assessment for runoff impacts: A case study in a north-western European Loess belt region (Pays de Caux, France). *Catena* 86, 36-48.
- Rossing, W.A.H., Meynard, J.M., vanIttersum, M.K., 1997. Model-based explorations to support development of sustainable farming systems: case studies from France and the Netherlands. *European Journal of Agronomy* 7.
- Rotmans, J., van Asselt, M., Anastasi, C., Greeuw, S., Mellors, J., Peters, S., Rothman, D., Rijkens, N., 2000. Visions for a sustainable Europe. *Futures* 32, 809-831.

- Rotmans, J., VanAsselt, M., 1996. Integrated assessment: A growing child on its way to maturity - An editorial essay. *Climatic Change* 34.
- Rounsevell, M.D.A., Annetts, J.E., Audsley, E., Mayr, T., Reginster, I., 2003. Modelling the spatial distribution of agricultural land use at the regional scale. *Agriculture Ecosystems & Environment* 95, 465-479.
- Rounsevell, M.D.A., Ewert, F., Reginster, I., Leemans, R., Carter, T.R., 2005. Future scenarios of European agricultural land use. II. Projecting changes in cropland and grassland. *Agriculture, Ecosystems & Environment* 107, 117-135.
- Rounsevell, M.D.A., Reginster, I., Araujo, M.B., Carter, T.R., Dendoncker, N., Ewert, F., House, J.I., Kankaanpaa, S., Leemans, R., Metzger, M.J., Schmit, C., Smith, P., Tuck, G., 2006. A coherent set of future land use change scenarios for Europe. *Agriculture Ecosystems & Environment* 114.
- Rouxel, T., Balesdent, M.H., 2010. Avirulence genes. In *Encyclopedia of Life Sciences*, John Wiley & Sons.
- Rouxel, T., Penaud, A., Pinochet, X., Brun, H., Gout, L., Delourme, R., Schmit, J., Balesdent, M.H., 2003. A 10-year survey of populations of *Leptosphaeria maculans* in France indicates a rapid adaptation towards the Rlm1 resistance gene of oilseed rape. *European Journal of Plant Pathology* 109, 871-881.
- Rusch, A., Valantin-Morison, M., Roger-Estrade, J., Sarthou, J.P., 2012. Using landscape indicators to predict high pest infestations and successful natural pest control at the regional scale. *Landscape and Urban Planning* 105, 62-73.
- Rusch, A., Valantin-Morison, M., Sarthou, J.P., Roger-Estrade, J., 2011. Multi-scale effects of landscape complexity and crop management on pollen beetle parasitism rate. *Landscape Ecology* 26, 473-486.
- Ryu, J.H., Palmer, R.N., Jeong, S., Lee, J.H., Kim, Y.O., 2009. SUSTAINABLE WATER RESOURCES MANAGEMENT IN A CONFLICT RESOLUTION FRAMEWORK. *Journal of the American Water Resources Association* 45, 485-499.
- Sadok, W., Angevin, F., Bergez, J.-E., Bockstaller, C., Colomb, B., Guichard, L., Reau, R., Messean, A., Dore, T., 2009. MASC, a qualitative multi-attribute decision model for ex ante assessment of the sustainability of cropping systems. *Agronomy for Sustainable Development* 29.
- Salam, M.U., Fitt, B.D.L., Aubertot, J.N., Diggle, A.J., Huang, Y.J., Barbetti, M.J., Gladders, P., Jedryczka, M., Khangura, R.K., Wratten, N., Fernando, W.G.D., Penaud, A., Pinochet, X., Sivasithamparam, K., 2007. Two weather-based models for predicting the onset of seasonal release of ascospores of *Leptosphaeria maculans* or *L.-biglobosa*. *Plant Pathology* 56, 412-423.
- Sante-Riveira, I., Crecente-Maseda, R., Miranda-Barros, D., 2008. GIS-based planning support system for rural land-use allocation. *Computers and Electronics in Agriculture* 63, 257-273.
- Sausse, C., Colbach, N., Young, M.W., Squire, G.R., 2012. How to manage the impact of gene flow on oilseed rape grain quality? Simulation case studies of three contrasted landscapes. *European Journal of Agronomy* 38.
- Savary, S., Teng, P.S., Willocquet, L., Nutter, F.W., 2006. Quantification and modeling of crop losses: A review of purposes. *Annual Review of Phytopathology* 44, 89-112.
- Schafer, J.F., 1971. Tolerance to plant disease. *Annual Review of Phytopathology* 9, 235-252.

- Schaller, N., Lazrak, E.G., Martin, P., Mari, J.F., Aubry, C., Benoit, M., 2012. Combining farmers' decision rules and landscape stochastic regularities for landscape modelling. *Landscape Ecology* 27, 433-446.
- Schiff, C.L., Wilson, I.W., Somerville, S.C., 2001. Polygenic powdery mildew disease resistance in *Arabidopsis thaliana*: quantitative trait analysis of the accession Warschau-1. *Plant Pathology* 50, 690-701.
- Schmidt, A., Guichard, L., Reau, R., 2010. Le colza est très dépendant des pesticides dans les rotations courtes sans labour. Synthèse Agreste. <http://agreste.agriculture.gouv.fr/publications/syntheses/article/syntheses-le-colza-est-tres> [En ligne]. Consulté le 05 février 2011.
- Schneider, O., 2005. Analyse du mode de gestion des résidus de colza sur l'initiation du cycle de *Leptosphaeria maculans* (Desm.) Ces et de Not. Mémoire de thèse, INA P-G, Paris, France.
- Schneider, A., Flénet, F., Dumans, P., Bonnin, E., De Chezelles, E., Jeuffroy, M-H., Hayer F., Nemecek, T., Carrouée B., 2010. Diversifier les rotations céréalières notamment avec du pois et du colza – Données récentes d'expérimentations et d'études. *OCL* 17, 292-300
- Schneider, O., Roger-Estrade, J., Aubertot, J.N., Dore, T., 2006. Effect of seeders and tillage equipment on vertical distribution of oilseed rape stubble. *Soil & Tillage Research* 85, 115-122.
- Sebillotte, M., 1978. Itinéraires techniques et évolution de la pensée agronomique. *C.R. Académie d'Agriculture Française* 11, 906-913.
- Sebillotte, M., 1990. Système de culture, un concept opératoire pour les agronomes. In Combe, L. and Picard, D. (Eds), *Les systèmes de culture*. INRA, Paris, pp 165-196.
- SharedVisionPlanning, 2012. Site Internet de SharedVisionPlanning. <http://sharedvisionplanning.us/> (Consulté le 17/08/12)
- Shea, K., Thrall, P.H., Burdon, J.J., 2000. An integrated approach to management in epidemiology and pest control. *Ecology Letters* 3, 150-158.
- Skelsey, P., Kessel, G.J.T., Holtslag, A.A.M., Moene, A.F., van der Werf, W., 2009a. Regional spore dispersal as a factor in disease risk warnings for potato late blight: A proof of concept. *Agricultural and Forest Meteorology* 149, 419-430.
- Skelsey, P., Rossing, W.A.H., Kessel, G.J.T., Powell, J., van der Werf, W., 2005. Influence of host diversity on development of epidemics: An evaluation and elaboration of mixture theory. *Phytopathology* 95.
- Skelsey, P., Rossing, W.A.H., Kessel, G.J.T., van der Werf, W., 2009b. Scenario Approach for Assessing the Utility of Dispersal Information in Decision Support for Aerially Spread Plant Pathogens, Applied to *Phytophthora infestans*. *Phytopathology* 99, 887-895.
- Skelsey, P., Rossing, W.A.H., Kessel, G.J.T., van der Werf, W., 2010. Invasion of *Phytophthora infestans* at the Landscape Level: How Do Spatial Scale and Weather Modulate the Consequences of Spatial Heterogeneity in Host Resistance? *Phytopathology* 100, 1146-1161.
- Snoeiijers, S.S., Perez-Garcia, A., Joosten, M., De Wit, P., 2000. The effect of nitrogen on disease development and gene expression in bacterial and fungal plant pathogens. *European Journal of Plant Pathology* 106.

- Souchere, V., Millair, L., Echeverria, J., Bousquet, F., Le Page, C., Etienne, M., 2010. Co-constructing with stakeholders a role-playing game to initiate collective management of erosive runoff risks at the watershed scale. *Environmental Modelling & Software* 25, 1359-1370.
- Sprague, S.J., Balesdent, M.H., Brun, H., Hayden, H.L., Marcroft, S.J., Pinochet, X., Rouxel, T., Howlett, B.J., 2006. Major gene resistance in *Brassica napus* (oilseed rape) is overcome by changes in virulence of populations of *Leptosphaeria maculans* in France and Australia. *European Journal of Plant Pathology* 114, 33-40.
- Steed, J.M., Baierl, A., Fitt, B.D.L., 2007. Relating plant and pathogen development to optimise fungicide control of phoma stem canker (*Leptosphaeria maculans*) on winter oilseed rape (*Brassica napus*). *European Journal of Plant Pathology* 118, 359-373.
- Sterk, B., Leeuwis, C., van Ittersum, M.K., 2009. Land use models in complex societal problem solving: Plug and play or networking? *Environmental Modelling & Software* 24, 165-172.
- Stoate, C., Baldi, A., Beja, P., Boatman, N.D., Herzon, I., van Doorn, A., de Snoo, G.R., Rakosy, L., Ramwell, C., 2009. Ecological impacts of early 21st century agricultural change in Europe - A review. *Journal of Environmental Management* 91, 22-46.
- Stoate, C., Boatman, N.D., Borralho, R.J., Carvalho, C.R., de Snoo, G.R., Eden, P., 2001. Ecological impacts of arable intensification in Europe. *Journal of Environmental Management* 63, 337-365.
- Stolte, J., Ritsema, C., Bouma, J., 2005. Developing interactive land use scenarios on the Loess Plateau in China, presenting risk analyses and economic impacts. *Agriculture Ecosystems & Environment* 105, 387-399.
- Stone, N. D., Buick, R. D., Roach, J. W., Scheckler, R. K., Rupani, R., 1992. The planning problem in agriculture: Farm-level crop rotation planning as an example. *AI Applications* 6 (1), 59-75.
- Stukenbrock, E.H., McDonald, B.A., 2008. The origins of plant pathogens in agro-ecosystems. *Annual Review of Phytopathology* 46, 75-100.
- Sun, P., Fitt, B.D.L., Steed, J.M., Underwood, C.T., West, J.S., 2001. Factors affecting development of phoma canker (*Leptosphaeria maculans*) on stems of winter oilseed rape (*Brassica napus*) in southern England. *Annals of Applied Biology* 139, 227-242.
- Swart, R.J., Raskin, P., Robinson, J., 2004. The problem of the future: sustainability science and scenario analysis. *Global Environmental Change-Human and Policy Dimensions* 14, 137-146.
- Thenail, C., Joannon, A., Capitaine, M., Souchere, V., Mignolet, C., Schermann, N., Di Pietro, F., Pons, Y., Gaucherel, C., Viaud, V., Baudry, J., 2009. The contribution of crop-rotation organization in farms to crop-mosaic patterning at local landscape scales. *Agriculture Ecosystems & Environment* 131, 207-219.
- Therond, O., Belhouchette, H., Janssen, S., Louhichi, K., Ewert, F., Bergez, J.E., Wery, J., Heckelei, T., Olsson, J.A., Leenhardt, D., Ittersum, M.v., 2009. Methodology to translate policy assessment problems into scenarios: the example of the SEAMLESS integrated framework. *Environmental Science & Policy* 12, 619-630.
- Thies, C., Steffan-Dewenter, I., Tschardtke, T., 2008. Interannual landscape changes influence plant-herbivore-parasitoid interactions. *Agriculture Ecosystems & Environment* 125, 266-268.
- Thomas, J.C., 1990. Public involvement in public management; adapting and testing a borrowed theory. *Pub. Admin. Rev.* 50, 435-445

- Thrall, P.H., Burdon, J.J., 2002. Evolution of gene-for-gene systems in metapopulations: the effect of spatial scale of host and pathogen dispersal. *Plant Pathology* 51, 169-184.
- Tilman, D., Cassman, K.G., Matson, P.A., Naylor, R., Polasky, S., 2002. Agricultural sustainability and intensive production practices. *Nature* 418, 671-677.
- Tippett, J., Handley, J.F., Ravetz, J., 2007. Meeting the challenges of sustainable development - A conceptual appraisal of a new methodology for participatory ecological planning. *Progress in Planning* 67, 9-98.
- Tixier, P., Risede, J.M., Dorel, M., Malezieux, E., 2006. Modelling population dynamics of banana plant-parasitic nematodes: A contribution to the design of sustainable cropping systems. *Ecological Modelling* 198, 321-331.
- Tompkins, E.L., Few, R., Brown, K., 2008. Scenario-based stakeholder engagement: incorporating stakeholders preferences into coastal planning for climate change. *Journal of Environmental Management* 88, 1580-1592.
- Toscano-Underwood, C., West, J.S., Fitt, B.D.L., Todd, A.D., Jedryczka, M., 2001. Development of phoma lesions on oilseed rape leaves inoculated with ascospores of A-group or B-group *Leptosphaeria maculans* (stem canker) at different temperatures and wetness durations. *Plant Pathology* 50, 28-41.
- Travadon, R., 2008. Facteurs épidémiologiques contribuant à l'adaptation des populations de *Leptosphaeria maculans* aux résistances spécifiques de *Brassica napus* : dispersion des pycnidiospores et des ascospores et progression systémique du champignon. Mémoire pour l'obtention du diplôme de docteur de l'Ecole Nationale Supérieure Agronomique de Rennes, 142 p.
- Travadon, R., Bousset, L., Saint-Jean, S., Brun, H., Sache, I., 2007. Splash dispersal of *Leptosphaeria maculans* pycnidiospores and the spread of blackleg on oilseed rape. *Plant Pathology* 56, 595-603.
- Travadon, R., Sache, I., Dutech, C., Stachowiak, A., Marquer, B., Bousset, L., 2011. Absence of isolation by distance patterns at the regional scale in the fungal plant pathogen *Leptosphaeria maculans*. *Fungal Biology* 115, 649-659.
- Tress, B., Tress, G., 2003. Scenario visualisation for participatory landscape planning - a study from Denmark. *Landscape and Urban Planning* 64, 161-178.
- Tricault, Y., Darmency, H., Colbach, N., 2009. Identifying key components of weed beet management using sensitivity analyses of the GeneSys-Beet model in GM sugar beet. *Weed Research* 49, 581-591.
- Tricault, Y., Fealy, R., Colbach, N., Mullins, E., 2011. Towards an optimal management regime to facilitate the coexistence of GM herbicide tolerant and non-GM oilseed rape. *European Journal of Agronomy* 34, 26-34.
- Turkington, T.K., Clayton, G.W., Klein-Gebbinck, H., Woods, D.L., 2000. Residue decomposition and blackleg of canola: influence of tillage practices. *Canadian Journal of Plant Pathology-Revue Canadienne De Phytopathologie* 22, 150-154.
- Valantin-Morison, M., Meynard, J.M., 2008. Diagnosis of limiting factors of organic oilseed rape yield. A survey of farmers' fields. *Agronomy for Sustainable Development* 28, 527-539.
- Valkering, P., van der Brugge, R., Offermans, A., Rijkens-Klomp, N., 2011. Scenario analysis of perspective change to support climate adaptation: lessons from a pilot study on Dutch river management. *Regional Environmental Change* 11, 229-241.

- van Asselt, M.B.A., Rijkens-Klomp, N., 2002. A look in the mirror: reflection on participation in Integrated Assessment from a methodological perspective. *Global Environmental Change-Human and Policy Dimensions* 12, 167-184.
- van Berkel, D.B., Carvalho-Ribeiro, S., Verburg, P.H., Lovett, A., 2011. Identifying assets and constraints for rural development with qualitative scenarios: A case study of Castro Laboreiro, Portugal. *Landscape and Urban Planning* 102, 127-141.
- van Delden, H., van Vliet, J., Rutledge, D.T., Kirkby, M.J., 2011. Comparison of scale and scaling issues in integrated land-use models for policy support. *Agriculture Ecosystems & Environment* 142, 18-28.
- van den Belt, M., 2004a. Introduction, in: van den Belt, M. (ed.), *Mediated Modeling. A System Dynamics Approach to Environmental Consensus Building*. Island Press, Washington D.C., USA, pp. 1-14.
- van den Belt, M., 2004b. Lessons Learned, in: van den Belt, M. (ed.), *Mediated Modeling. A System Dynamics Approach to Environmental Consensus Building*. Island Press, Washington D.C., USA, pp. 230-244.
- van den Belt, M., 2004c. The Role of Mediated Modeling, in: van den Belt, M. (ed.), *Mediated Modeling. A System Dynamics Approach to Environmental Consensus Building*. Island Press, Washington D.C., U.S.A, pp. 15-39.
- van den Belt, M., Kenyan, J.R., Krueger, E., Maynard, A., Roy, M.G., Raphael, I., 2010. Public sector administration of ecological economics systems using mediated modeling. *Ecological Economics Reviews* 1185, 196-210.
- van den Belt, M., Wenger, R., Harris, B., 2004. Decision Support for Watershed Management in the Upper Fox River Basin, Wisconsin, U.S.A., in: van den Belt, M. (ed.), *Mediated Modeling. A system Dynamics Approach to Environmental Consensus Building*. Island Press, Washington D.C., U.S.A, pp. 99-135.
- van den Bosch, F., Akudibilah, G., Seal, S., Jeger, M., 2006. Host resistance and the evolutionary response of plant viruses. *Journal of Applied Ecology* 43, 506-516.
- van den Bosch, F., Gilligan, C.A., 2003. Measures of durability of resistance. *Phytopathology* 93, 616-625.
- van der Planck, J.E., 1963. *Plant diseases: epidemics and control*. New York, Academic Press.
- van Ittersum, M.K., Ewert, F., Heckelei, T., Wery, J., Olsson, J.A., Andersen, E., Bezlepikina, I., Brouwer, F., Donatelli, M., Flichman, G., Olsson, L., Rizzoli, A.E., van der Wal, T., Wien, J.E., Wolf, J., 2008. Integrated assessment of agricultural systems - A component-based framework for the European Union (SEAMLESS). *Agricultural Systems* 96, 150-165.
- van Ittersum, M.K., Rabbinge, R., 1997. Concepts in production ecology for analysis and quantification of agricultural input-output combinations. *Field Crops Research* 52, 197-208.
- van Ittersum, M.K., Rabbinge, R., van Latesteijn, H.C., 1998. Exploratory land use studies and their role in strategic policy making. *Agricultural Systems* 58, 309-330.
- van Notten, P.W.F., 2005. *Writing on the Wall: Scenario development in Times of Discontinuity*. Maastricht University, Maastricht, p. 225.
- van Notten, P.W.F., Rotmans, J., van Asselt, M.B.A., Rothman, D.S., 2003. An updated scenario typology. *Futures* 35, 423-443.

- van Notten, P.W.F., Slegers, A.M., van Asselt, M.B.A., 2005. The future shocks: On discontinuity and scenario development. *Technological Forecasting and Social Change* 72, 175-194.
- van Vliet, M., Kok, K., Veldkamp, T., 2010. Linking stakeholders and modellers in scenario studies: The use of Fuzzy Cognitive Maps as a communication and learning tool. *Futures* 42, 1-14.
- Varum, C.A., Melo, C., 2010. Directions in scenario planning literature - A review of the past decades. *Futures* 42, 355-369.
- Vayssieres, J., Vigne, M., Alary, V., Lecomte, P., 2011. Integrated participatory modelling of actual farms to support policy making on sustainable intensification. *Agricultural Systems* 104, 146-161.
- Veldkamp, A., Fresco, L.O., 1997. Exploring land use scenarios, an alternative approach based on actual land use. *Agricultural Systems* 55, 1-17.
- Verburg, P., Kok, K., Veldkamp, T., 2005. Pixels or agents? Modelling land-use and land-cover change. *IHDP Newsletter* 3, 8-9.
- Verburg, P.H., Rounsevell, M.D.A., Veldkamp, A., 2006. Special issue: Scenario-based studies of future land use in Europe. *Agriculture, Ecosystems & Environment* 114, 1-140.
- Vereijken, P., 1997. A methodical way of prototyping integrated and ecological arable farming systems (I/EAFS) in interaction with pilot farms. *European Journal of Agronomy* 7, 235-250.
- Viaud, V., Monod, H., Lavigne, C., Angevin, F., Adamczyk, K., 2008. Spatial sensitivity of maize gene-flow to landscape pattern: a simulation approach. *Landscape Ecology* 23, 1067-1079.
- Videira, N., van den Belt, M., Antunes, P., Santos, R., Gamito, S., 2004. Decision Support in Coastal Zone Management in the Ria Formosa, Portugal, in: van den Belt, M. (ed.), *Mediated Modeling. A System Dynamics Approach to Environmental Consensus Building*. Island Press, Washington D.C., U.S.A, pp. 205-229.
- Vitousek, P.M., Mooney, H.A., Lubchenco, J., Melillo, J.M., 1997. Human domination of Earth's ecosystems. *Science* 277, 494-499.
- Voinov, A., Bousquet, F., 2010. Modelling with stakeholders. *Environmental Modelling & Software* 25, 1268-1281.
- Voinov, A., Gaddis, E.J.B., 2008. Lessons for successful participatory watershed modeling: A perspective from modeling practitioners. *Ecological Modelling* 216, 197-207.
- Volk, M., Ewert, F., 2011. Scaling methods in integrated assessment of agricultural systems-State-of-the-art and future directions. *Agriculture Ecosystems & Environment* 142, 1-5.
- Wallerstein, N., 1999. Power between evaluator and community: research relationships within New Mexico's healthier communities. *Social Science & Medicine* 49, 39-53.
- Walz, A., Lardelli, C., Behrendt, H., Gret-Regamey, A., Lundstrom, C., Kytzia, S., Bebi, P., 2007. Participatory scenario analysis for integrated regional modelling. *Landscape and Urban Planning* 81, 114-131.
- Wei, Y.P., Davidson, B., Chen, D.L., White, R., 2009. Balancing the economic, social and environmental dimensions of agro-ecosystems: An integrated modeling approach. *Agriculture Ecosystems & Environment* 131, 263-273.
- West, J.S., Fitt, B.D.L., Leech, P.K., Biddulph, J.E., Huang, Y.J., Balesdent, M.H., 2002. Effects of timing of *Leptosphaeria maculans* ascospore release and fungicide regime on phoma leaf spot and phoma stem canker development on winter oilseed rape (*Brassica napus*) in southern England. *Plant Pathology* 51, 454-463.

- West, J.S., Kharbanda, P.D., Barbetti, M.J., Fitt, B.D.L., 2001. Epidemiology and management of *Leptosphaeria maculans* (phoma stem canker) on oilseed rape in Australia, Canada and Europe. *Plant Pathology* 50, 10-27.
- West, J.S., Latunde-Dada, A.O., Huang, Y.J., Evans, N., Fitt, B.D.L., 2006. Avirulence management for durable control of stem canker of oilseed rape in Europe. *Aspects of Applied Biology*, 171-176.
- Whittingham, M.J., 2007. Will agri-environment schemes deliver substantial biodiversity gain, and if not why not? *Journal of Applied Ecology* 44, 1-5.
- Wijnands, E., 1999. Crop rotation in organic farming: theory and practice. In: *Designing and testing crop rotations for organic farming. Proceedings from an international workshop*. Danish Research Centre for Organic Farming, pp. 21–35
- Wilkinson, A., Eidinow, E., 2008. Evolving practices in environmental scenarios: a new scenario typology. *Environmental Research Letters* 3.
- Williams, P.H., 1992. Biology of *Leptosphaeria maculans*. *Canadian Journal of Plant Pathology- Revue Canadienne De Phytopathologie* 14, 30-35.
- With, K.A., 2002. The landscape ecology of invasive spread. *Conservation Biology* 16, 1192-1203.
- Zadoks, J.C., 1993. Cultural methods. In Zadoks, J.C. (Ed), *Modern crop protection: development and perspectives*. Wageningen Pers, Wageningen, pp 163-170.
- Zadoks, J. C., Kampmeijer, P., 1977. The role of crop populations and their deployment, illustrated by means of a simulator. *Annals of the New York Academy of Sciences*, 287, 164–190.
- Zhang, W., Ricketts, T.H., Kremen, C., Carney, K., Swinton, S.M., 2007. Ecosystem services and dis-services to agriculture. *Ecological Economics* 64, 253-260.
- Zhu, Y., Chen, H., Fan, J., Wang, Y, Li, Y., Fan, J., Yang, S., Hu, L., Leung, H., Mew, T.W., Teng P.S., Wang Z., Mundt C.C., 2000. Genetic diversity and disease control in rice. *Nature* 406, 718-722.
- Zurek, M.B., Henrichs, T., 2007. Linking scenarios across geographical scales in international environmental assessments. *Technological Forecasting and Social Change* 74, 1282-1295.

Annexes

Liste des Annexes

Annexe A. Données pédologiques de simulation.....	222
Annexe B. Pratiques culturelles détaillées à l'échelle de la région	224
Annexe C. Données climatiques de simulation.....	226
Annexe D. Présentation des rotations de la situation de référence utilisée en région Centre.....	228
Annexe E. Questionnaire d'évaluation de la méthode <i>ex post</i>	229
Annexe F. Diagramme des ressources du modèle SIPPOM-WOSR	230
Annexe G. Diagramme ARDI construit collectivement en région Centre : Ressources.....	231
Annexe H. Diagramme ARDI construit collectivement en région Centre : Schéma simplifié	232

Annexe A. Données pédologiques de simulation

1.1. Région Centre

num_sol	profSol	RU	Surface(%)
1	20	40	25
2	75	135	25
3	30	70	25
4	45	90	15
5	80	120	10

Table A. 1. Caractéristiques des 15 types de sols identifiés pour les simulations de la région Centre.

Surface(%) : surface du type de sol par rapport à la surface totale du support de simulation ; Num_sol : numéro du type de sol ; profSol : profondeur de sol (cm) ; RU : réserve utile (mm d'eau)

1.2. Région Picardie

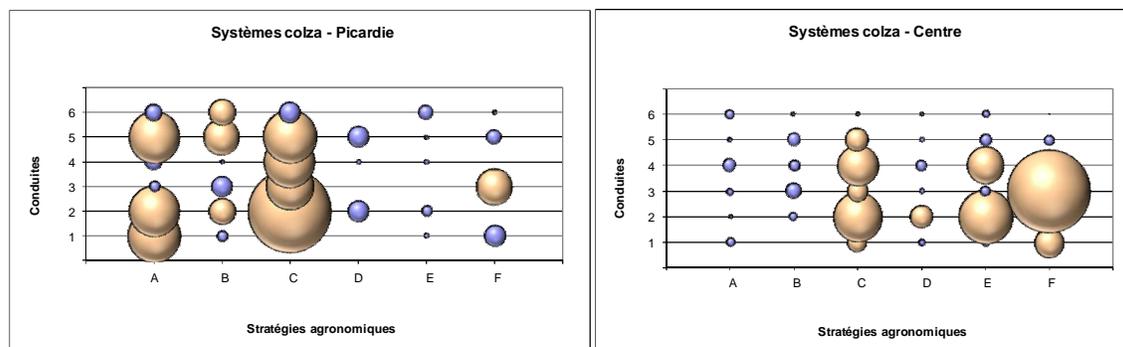
num_sol	profSol	RU	Surface(%)
1	120	230	29.8
2	90	130	20.6
3	100	190	9
4	120	100	6.9
5	120	210	5.3
6	75	140	4.3
7	120	150	3.2
8	90	110	3.2
9	75	100	3.2
10	90	140	3.2
11	50	70	2.6
12	100	170	2.3
13	50	110	2.2
14	50	60	2.1
15	50	80	2.1

Table A. 2. Caractéristiques des 15 types de sols identifiés pour les simulations de la région Picardie.

Surface(%) : surface du type de sol par rapport à la surface totale du support de simulation ; Num_sol : numéro du type de sol ; profSol : profondeur de sol (cm) ; RU : réserve utile (mm d'eau)

Annexe B. Pratiques culturales détaillées à l'échelle de la région

Pratiques à l'échelle du système de culture et de la conduite



Légende :

Stratégie agronomique	A	B	C	D	E	F
Libellé	Polyculture-élevage en rotations longues et diversifiées	Polyculture-élevage en rotations courtes céréalières	Rotations longues de grande culture	Rotations courtes, labour et pailles ramassées	Rotations courtes, labour et pailles laissées	Rotations très courtes, sans-labour
Fréquence colza	1,4	1,6	1,5	1,8	2	2,3
Fréquence labour	3,7	3,3	4,5	5,3	5,2	0,8-1,4

Conduite culturale	1	2	3	4	5	6
Libellé	Fertilisation élevée, semences certifiées sans labour	Fertilisation modérée, semences certifiées sur labour	Fertilisation modérée, semences fermières sans labour	Fertilisation modérée, semences fermières sur labour	Semis tarif, fertilisation modérée, semences certifiée	Fertilisation très réduite

Figure B. 1. Stratégies agronomiques et conduites du colza des régions Picardie et Centre, identifiées à l'échelle nationale par Schmidt *et al.* (2010) (source : données Enquêtes Pratiques Culturelles 2006 du SCEES)

Pour la définition des conduites, le labour indiqué concerne l'implantation du colza, i.e. le labour avant semis du colza.

Pratiques culturales à l'échelle individuelle

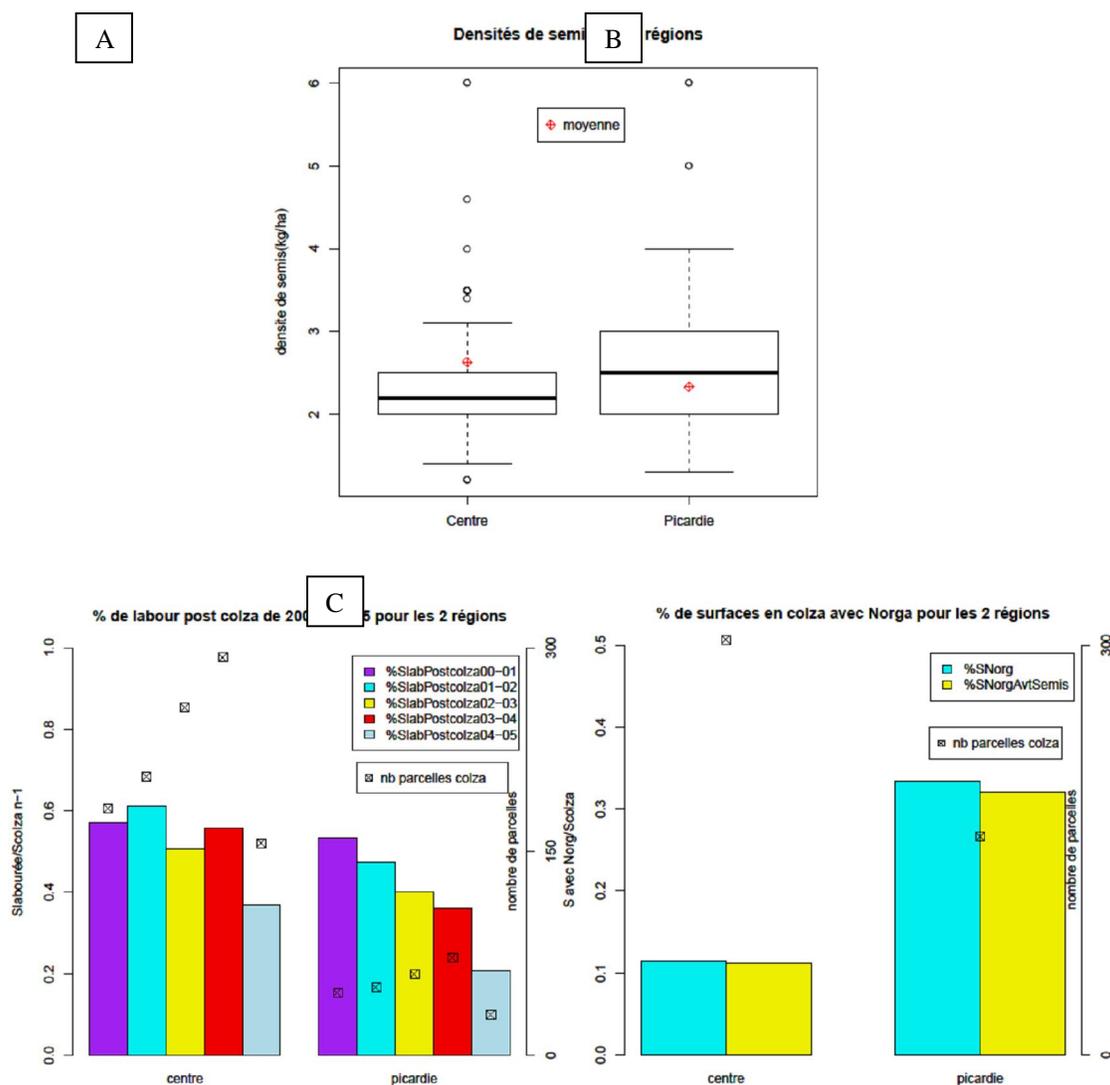


Figure B. 2. Pratiques culturales des régions Centre et Picardie pour les années 2001-2005 (Source : Enquêtes Pratiques Culturelles 2006 du SCEES)

A : Diversité des densités de semis ; B : pourcentage de labour après récolte du colza (données calculées sur les travaux du sol pour le semis du blé) ; C : fertilisation organique (totale et avant semis)

Annexe C. Données climatiques de simulation

1.1. Région Centre

Les données météorologiques utilisées pour les simulations de la région Centre proviennent de la station Météo France située à Civray, localisée à 46°59'30''Nord et 02°10'54''Est (Figure B. 1). L'année 2004 est répétée pour construire la séquence climatique utilisée pour les simulations sous climat présentant des conditions climatiques a priori favorable aux épidémies de phoma, i.e. « climat avec automnes doux et humides ».

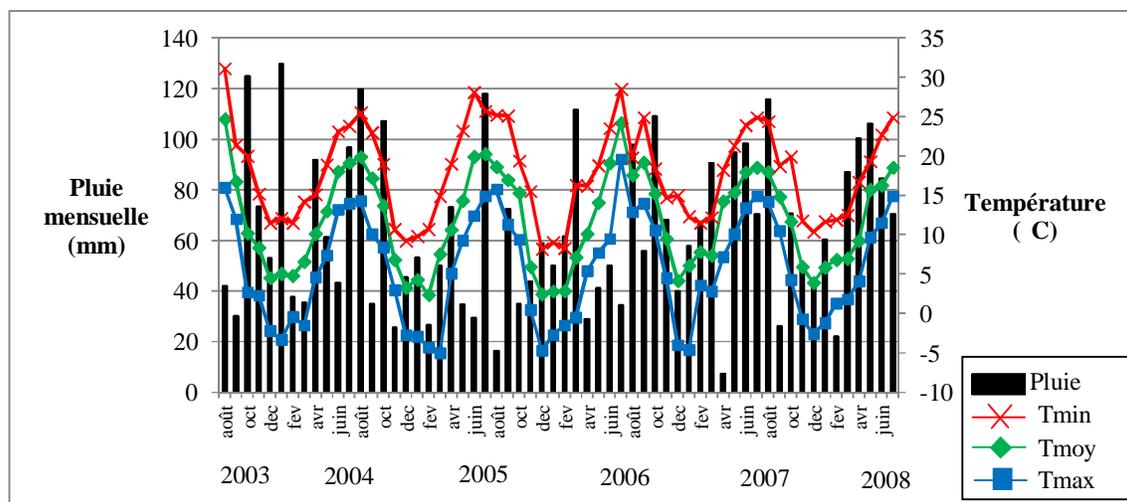


Figure C. 1. Données météorologiques utilisées pour les simulations de la région Centre (« climat normal »)

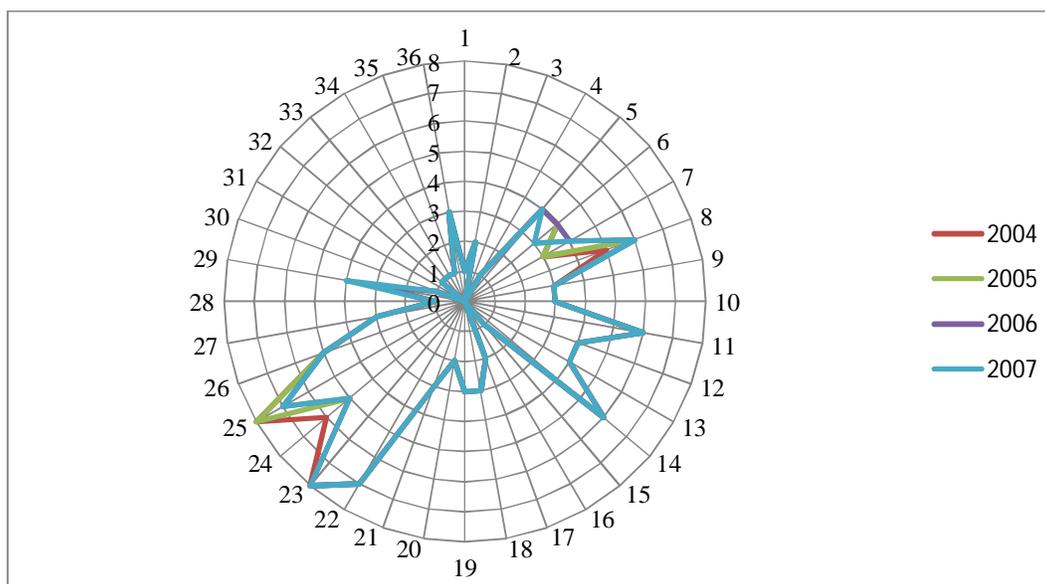


Figure C. 2. Directions du vent utilisées pour les simulations de la région Centre (« climat normal »)

1.2. Région Picardie

Les données météorologiques utilisées pour les simulations de la région Picardie proviennent de la station Météo France située à Beauvais, localisée à 49°26'42''Nord et 02°07'36''Est. L'année 2006 est répétée pour construire la séquence climatique utilisée pour les simulations sous climat présentant des conditions climatiques a priori favorable aux épidémies de phoma, i.e. « climat avec automnes doux et humides ».

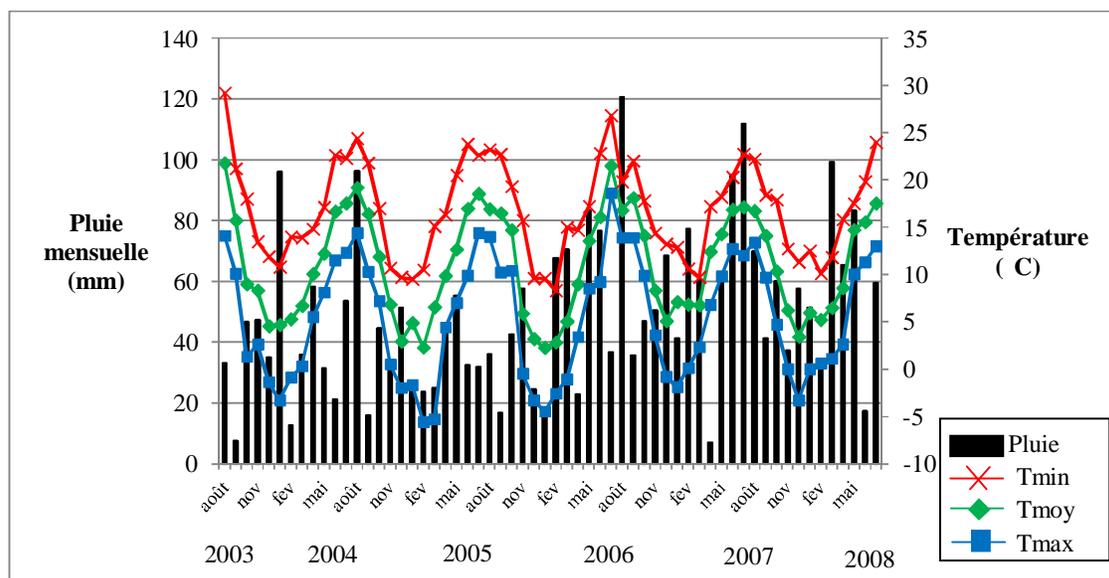


Figure C. 3. Données météorologiques utilisées pour les simulations de la région Picardie (« climat normal »)

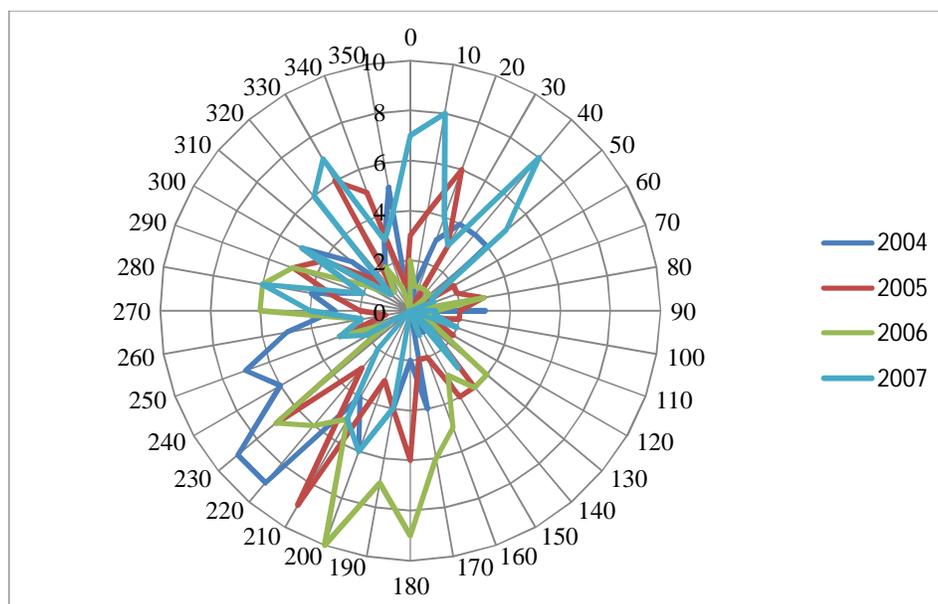


Figure C. 4. Directions du vent utilisées pour les simulations de la région Picardie (« climat normal »)

Annexe D. Présentation des rotations de la situation de référence utilisée en région Centre

délai de retour	fréquence dans parcellaire	Exemple de rotation
1 an sur 2	30%	CB
1 an sur 3	37%	CBO, CBB
1 an sur 4	25%	CBBO, CBTB
1 an sur 5	3%	CBTBO, CBTOP, CBOOT
1 an sur 6	5%	CBOTBO

Table D. 1. Rotations identifiées par enquêtes sur la zone de Civray pour la période 2004-2008 (enquêtes réalisées par le Maire Boillot, CETIOM)

B : Blé ; C : Colza ; O : Orge ; P : Pois ; T : Tournesol

Annexe E. Questionnaire d'évaluation de la méthode *ex post*

Questions générales
Les objectifs de l'étude étaient-ils clairs pour vous au début de l'étude
Sinon, le sont-ils maintenant ?
Pensez-vous que le sujet traité est d'actualité
Pensez-vous que l'approche utilisée pourrait-être intéressante pour d'autres thématiques ? Lesquelles ?
Ce type d'étude peut-il permettre d'atteindre un compromis, de faire converger les opinions en termes de développement local ?
Questions sur l'ensemble de l'approche
Pensez-vous que l'ensemble des organismes important pour cette étude a été représenté ?
Pensez-vous que l'ensemble des données nécessaires ont été utilisées ?
Avez-vous pu vous exprimer librement durant les réunions ?
Pensez-vous que votre opinion a été prise en compte ?
Cette réunion a-t-elle illustré la diversité des opinions ?
Est-ce que les intérêts des différents participants ont-été prises en compte, ou au moins représentées ?
Vision du problème
Quelle est votre perception du problème du phoma ? A-t-elle changé au cours de l'étude ?
Pensez-vous que le phoma doit être géré collectivement ? SI oui, comment d'après-vous ? Sous quelles conditions ?
Apprentissage
Qu'avez-vous appris durant l'étude ?
Ce que vous avez appris pendant l'étude vous sera-t-il utile ? Comment ?
Est-ce que cette étude a permis de modifier vos perspectives, actions, stratégies ? Si oui, comment ?
Relations
Quelles relations avez-vous eu avec les autres participants ?
Ces relations ont-elles évoluées au cours du projet ?
Comment avez-vous perçu ces interactions ?
Autres
Pourquoi avez-vous participé à cette étude
Commentaires

Table E. 1. Questionnaire utilisé pour recueillir les remarques des participants suite à l'étude menée

Annexe F. Diagramme des ressources du modèle SIPPOM-WOSR

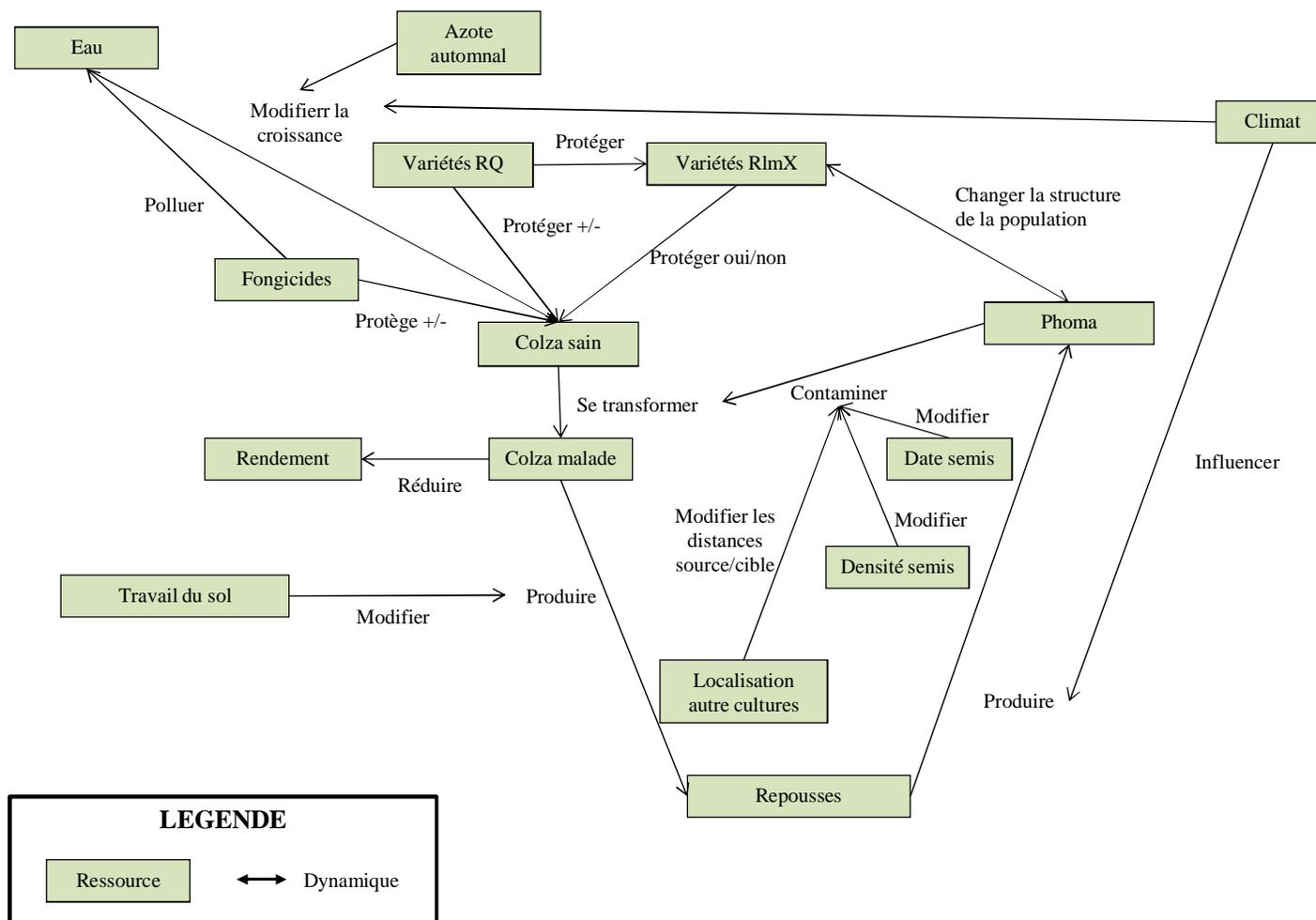


Figure F. 1. Diagramme des ressources du modèle SIPPOM-WOSR, adapté de Lôt-Pelzer *et al.* (2010a, 2010b)

Annexe G. Diagramme ARDI construit collectivement en région Centre : Ressources

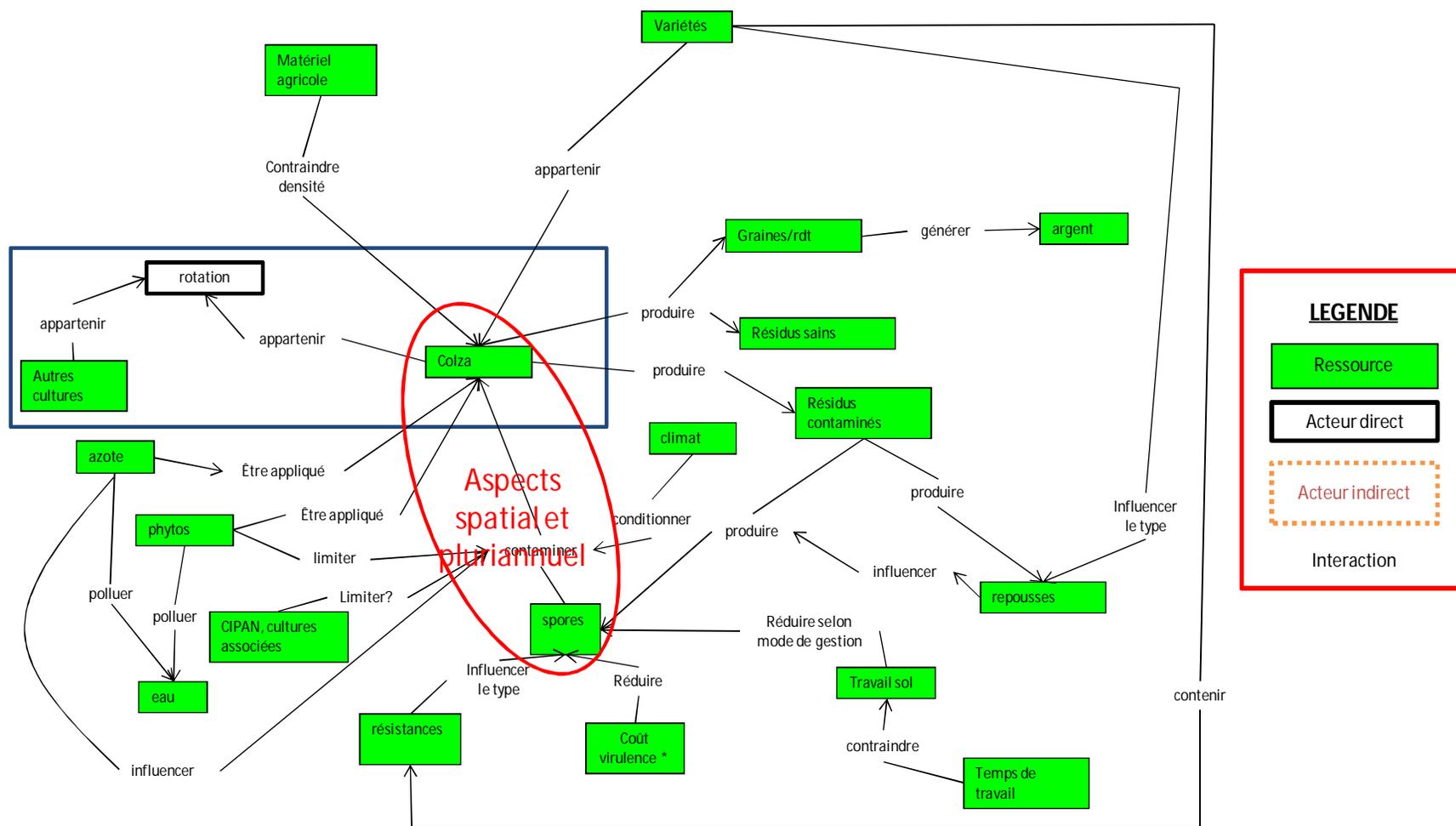


Figure G. 1. Diagramme ARDI construit collectivement en région Centre : Dynamiques des Ressources

Annexe H. Diagramme ARDI construit collectivement en région Centre : Schéma simplifié

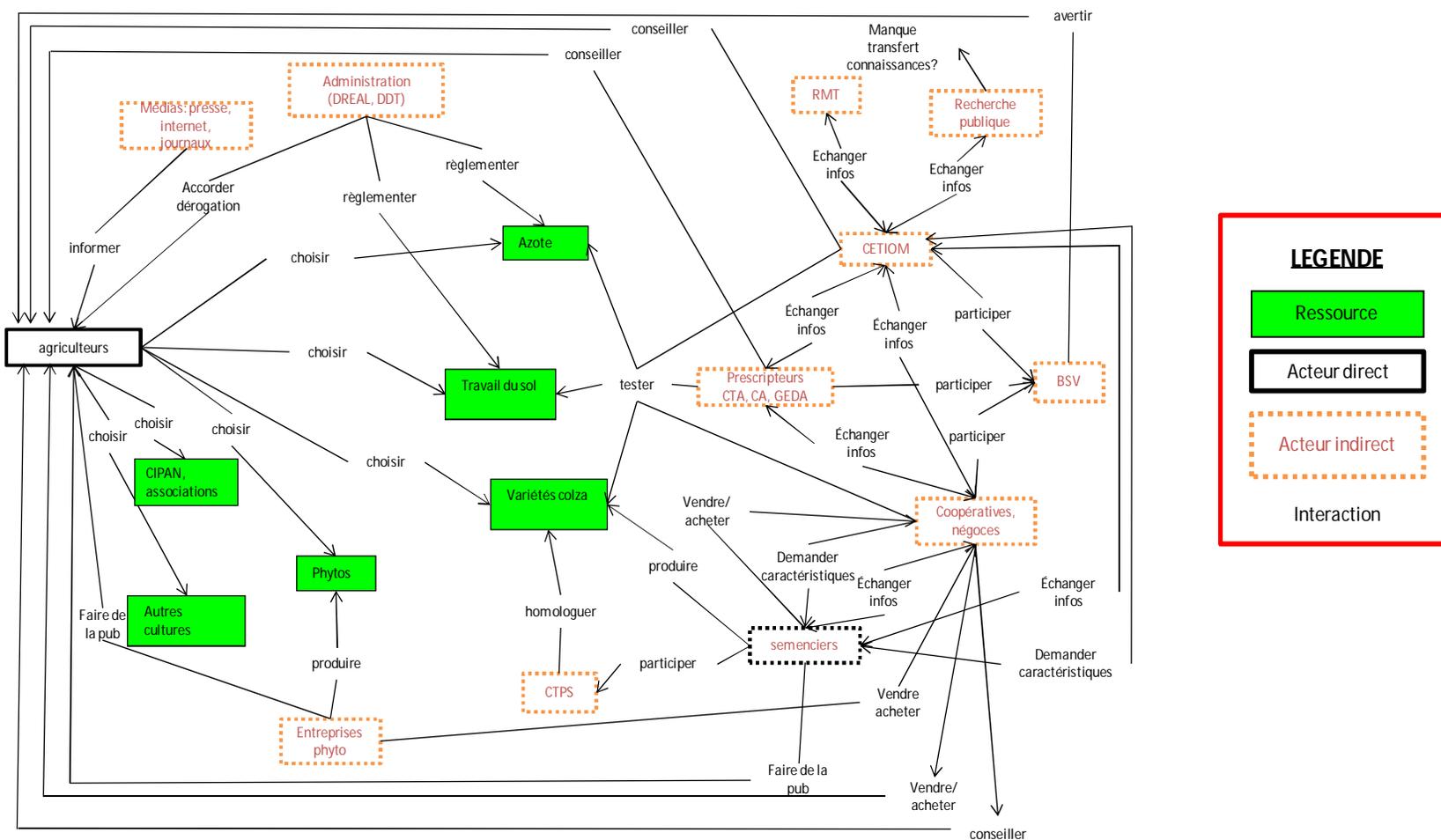


Figure H. 1. Diagramme ARDI construit en région Centre : principales ressources et dynamiques, ensemble des acteurs et de leurs interaction

Abstract: The intensification and the homogenization of agricultural systems led to agrosystèmes that are more sensible to pests and diseases. To limit the impacts of these pests and diseases without increasing pesticides use, an efficient solution is the use of resistant cultivars. Sustainability of these resistances can be low, in link with the adaptation of pathogen populations. It is thus necessary to design cropping systems allowing both the control of pests and diseases and preservation of cultivar resistances. Such management strategies can combine cropping practices and their spatial organization, for pathosystems whose agents are wind-dispersed. The design of these strategies can benefit from participatory approaches, taking into account the local cropping systems and stakeholders' organizations. The evaluation of these strategies, hardly testable in reality due to the spatial and temporal scales involved, can benefit from a modeling approach. Within this scope, this PhD thesis designed and tested, in two study regions, a participatory method of scenarios design, aiming at building with local stakeholders scenarios of spatial organization of cropping systems and to assess them with regards to their performances on phoma stem canker of winter oilseed rape and resistance durability management. Participatory designed scenarios explore agricultural futures that may happen by identifying the possible evolutions of the context (economic, political, regulatory or epidemic), in a predictive or more exploratory way. Scenarios are then evaluated numerically with a pre-existing model, for three criteria relevant for the stakeholders: yield losses, structure and size of the pathogen population. This analysis has been performed at two complementary spatial scales: the regional and the local scale, considering hundreds of meters around fields cropped with sensitive cultivars. These analyses showed the importance of crop rotations, cultivars and tillage for the evolution of the disease and resistance sustainability. These analyses also showed the necessity of taking into account different scales for disease management. Indeed, size of the pathogen population and yield losses are well related to the landscape composition in terms of cropping practices, but a more local scale is necessary for the assessment of the genetic structure of the pathogen population. This indicator is thus significantly linked with the cultivars and cropping practices in the 500 meters around fields cropped with the considered resistance. Finally, we explored spatial (isolation) and temporal rules for rapeseed spatial and temporal allocations that could be used to manage resistance. For these strategies to be applied, coordination between stakeholders at the agricultural territory would be necessary, which could be necessary in case of strong phoma stem canker epidemics. The method we applied could be used to explore other thematic with a spatial component, as for instance pests or erosion. This could allow a multi-criteria analysis, for instance taking into account pathogens of different crops included in a rotation, thus identifying the cropping practices that could promote management of these local problems.

Keywords : scenario, participatory design, spatially-explicit model, cropping systems, cultural control, resistance sustainability, spatial scale, winter oilseed rape, phoma stem canker

Résumé : L'intensification et l'homogénéisation des paysages agricoles a rendu les agrosystèmes plus sensibles aux bioagresseurs. Pour limiter les impacts de ces bioagresseurs sans recourir de manière intensive aux pesticides, une solution efficace est l'utilisation de variétés résistantes. La durabilité de ces résistances peut être faible, en lien avec l'adaptation des populations pathogènes. Il est donc nécessaire de concevoir des systèmes de culture permettant le contrôle des bioagresseurs et la préservation des ressources variétales. Ces stratégies de gestion peuvent reposer sur la combinaison de pratiques agricoles et d'organisation spatiale de ces pratiques, pour des pathosystèmes dont les agents sont dispersés par le vent. D'une part, la conception de ces stratégies peut bénéficier d'une approche participative, prenant en compte les conditions de culture et l'organisation des acteurs locaux. D'autre part, l'évaluation de ces stratégies, dont l'expérimentation est délicate du fait des échelles spatiale et temporelle requises, peut bénéficier d'une approche modélisatrice. Dans ce cadre, ce travail de thèse a mis au point et testé, sur deux régions d'étude, une méthode participative de construction de scénarios d'organisation spatiale des systèmes de culture, évalués vis-à-vis du contrôle du phoma du colza et de la gestion des résistances. Les scénarios co-construits explorent les futurs agricoles possibles en identifiant les tendances possibles d'évolution du contexte (économique, politique, réglementaire, épidémique), de manière prédictive ou plus exploratoire. Ils ont ensuite été évalués numériquement à l'aide d'un modèle préexistant, vis-à-vis de trois critères pertinents pour les acteurs : les pertes de rendement, la taille de la population pathogène et sa structure. Ces scénarios ont ensuite été évalués à l'aide de régressions linéaires, de manière à identifier les pratiques agricoles les plus influentes sur les trois critères d'évaluation considérés. Cette analyse a été réalisée à deux échelles spatiales complémentaires : l'échelle d'une petite région agricole et l'échelle locale, considérant plusieurs centaines de mètres autour des parcelles de colza pouvant être infectées. Ces analyses ont permis de mettre en évidence la prépondérance des rotations, des variétés et de la gestion des résidus de colza dans l'évolution de la maladie et sur la durabilité des résistances. Elles ont également montré la nécessité de prendre en compte plusieurs échelles pour la gestion de la maladie : si la taille de la population pathogène et les pertes de rendement peuvent être déterminées à partir de la composition en termes de systèmes de culture à l'échelle du paysage, une échelle plus locale est nécessaire pour évaluer l'évolution de la structure génétique de la population. Cet indicateur est en effet très lié aux variétés et aux pratiques présentes dans les 500 mètres autour des parcelles porteuses de la résistance considérée. Finalement, l'exploration de règles spatiales (isolement) et temporelles (maximisation des surfaces un an sur deux) des parcelles de colza ou des types variétaux a mis en exergue le fort potentiel de stratégies basées sur ces règles pour la gestion des résistances. La mise en place de ces stratégies nécessiterait une coordination entre les différents acteurs, à l'échelle du territoire agricole, qui pourrait s'avérer nécessaire en cas d'épidémie importante de phoma. La méthode mise en place pourrait être utilisée pour explorer la gestion d'autres thématiques à composante spatiale, comme par exemple l'érosion ou la gestion d'autres bioagresseurs. Ceci pourrait permettre une évaluation multicritère, prenant par exemple en compte les bioagresseurs de différentes cultures composant une même rotation, identifiant ainsi les pratiques les plus à même de gérer simultanément les différentes thématiques locales.

Mots-clés : scénario, conception participative, modèle de simulation spatialement explicite, systèmes de culture, leviers de gestion, durabilité des résistances, échelle spatiale, colza, phoma