



Université
de Toulouse

THÈSE

En vue de l'obtention du

DOCTORAT DE L'UNIVERSITÉ DE TOULOUSE

Délivré par :

Institut National Polytechnique de Toulouse (INP Toulouse)

Discipline ou spécialité :

Agrosystèmes, Écosystèmes et Environnement

Présentée et soutenue par :

Mme MARIE-HELENE ROBIN

le vendredi 7 février 2014

Titre :

ANALYSE ET MODELISATION DES EFFETS DES PRATIQUES
CULTURALES ET DE LA SITUATION DE PRODUCTION SUR LES
DEGATS CAUSES PAR LES BIOAGRESSEURS DES CULTURES.
APPLICATION AU BLE D'HIVER.

Ecole doctorale :

Sciences Ecologiques, Vétérinaires, Agronomiques et Bioingénieries (SEVAB)

Unité de recherche :

Agrosystèmes et développement territorial (A.G.I.R.)

Directeur(s) de Thèse :

M. PHILIPPE DEBAEKE

M. JEAN-NOEL AUBERTOT

Rapporteurs :

M. CHRISTIAN GARY, CIRAD MONTPELLIER

Mme ANNE LEGREVE, UNIVERSITE CATHOLIQUE DE LOUVAIN

Membre(s) du jury :

M. GREGORY DECHAMP GUILLAUME, INP TOULOUSE, Président

M. JEAN-NOEL AUBERTOT, INRA TOULOUSE, Membre

M. PHILIPPE GATE, ARVALIS INSTITUT DU VEGETAL PARIS, Membre

M. YVES DUMONT, CIRAD MONTPELLIER, Membre

REMERCIEMENTS

Ces remerciements sont dédiés à tous ceux qui m'ont soutenue au cours de ces trois années...

Je commencerai par les remerciements « officiels » :

Je voudrais remercier les financeurs de mon projet qui ont rendu possible sa réalisation, l'École d'Ingénieurs de Purpan, l'INRA de Toulouse UMR 1248 AGIR (ANR MicMac Design), l'ONEMA (projet ASPIB, APR Pesticides 2009 du MEEDME).

J'ai une pensée reconnaissante pour les rapporteurs et les membres de mon jury de thèse qui ont accepté la lecture de tous ces longs chapitres.

Mille mercis à Jean-Noël Aubertot, qui a accepté de travailler avec moi sur ce modèle sans équation ! Ta confiance a été inconditionnelle et sans faille, et ta patience et ton indulgence sans limite, surtout pour mon ouvrage de dentelière ! Ta tête fourmille d'idées, toutes aussi géniales et constructives, qui ont été un moteur si positif dans la dynamique de ce travail ; merci de m'avoir toujours poussée dans la rigueur scientifique et dans cette exigence qui me faisait parfois défaut. Ce projet, si ambitieux, possible grâce à nos parcours si complémentaires, n'aurait pu aboutir sans l'amitié et l'estime que nous partageons. Merci enfin d'avoir soutenu ton HDR pour être aujourd'hui mon directeur de thèse !

Un grand merci à Philippe Debaeke, mon directeur « officiel », dont la bienveillance et la gentillesse m'ont entourée d'une amicale compréhension.

Je tiens à remercier les membres de mon comité de pilotage, pour les échanges scientifiques enrichissants que nous avons pu avoir.

Je remercie tous les stagiaires de master, d'écoles d'ingénieur qui ont contribué, toujours avec un plaisir partagé, à la réalisation de mon travail : ceux qui ont œuvré

aux premières heures du modèle, Célia, Mathieu ; ceux qui ont développé les premières versions, Adèle, Elfie, Romain, Swann, Amélie, Julien. Merci encore, sans vous ce travail n'aurait pu s'achever.

Je tiens à exprimer ma gratitude à tous les membres de l'UMR AGIR et à tous mes collègues de l'EIPURPAN qui pour beaucoup m'ont apporté leur aide et leur soutien. Je n'oublie pas mes éminents collègues du bureau des thésards, Myriam, Hélène, Bochra, Toky, André, ... qui m'ont si gentiment aidée tout au long de ses 3 années partagées.

Je n'oublie pas les conseillers agricoles, les ingénieurs et techniciens des réseaux et tous les agriculteurs passionnants rencontrés dans cette aventure sans qui ce modèle n'aurait pu être développé.

Et maintenant les remerciements plus « personnels » :

Mes parents, sans qui ce travail n'aurait pas vu le jour ...Je leurs associe tous les membres de ma famille, qui savent tous à quel point je les aime.

Mes amis, qui ont été un soutien sans faille, Fabienne, Antoine, Lionel, Célia, Hélène, Simon, Christine, ... Pardon à tous ceux que j'oublie mais qui sont tout près dans mes pensées.

J.C pour avoir veillé jusqu'au bout à la bonne réalisation de ce travail, merci pour ta présence et ta patience.

Merci à mes filles, vos pensées de près ou de loin, votre joie et votre réconfort constant, notre amour bienveillant, ont permis que ce projet fou puisse un jour aboutir ; merci, merci à ma Flora, c'est grâce à ta patience et tes doigts magiques que ce manuscrit est aujourd'hui entre vos mains.

TABLE DES MATIERES

TABLE DES ILLUSTRATIONS.....	10
SOMMAIRE DES TABLEAUX.....	13
GLOSSAIRE.....	14
TABLE DES SIGLES ET DES ABREVIATIONS.....	17
INTRODUCTION.....	19
PREMIERE PARTIE. POSITIONNEMENT DE L'ETUDE DANS SON CONTEXTE SOCIO-ECONOMIQUE ET SCIENTIFIQUE.....	23
CHAPITRE 1. LA PROTECTION DES CULTURES FACE AUX NOUVEAUX ENJEUX AGRICOLES DE PRODUCTION ET DE PRESERVATION DE L'ENVIRONNEMENT.....	24
1. LA PROTECTION DES CULTURES, UNE NECESSITE.....	24
1.1. REDUIRE LES PERTES, UNE NECESSITE.....	25
1.2. HISTORIQUE DE LA PROTECTION DES CULTURES.....	27
2. UTILISATION MASSIVE DES PESTICIDES ET CONSEQUENCES.....	28
2.1. CONSTAT ACTUEL DES EFFETS NON INTENTIONNELS.....	28
2.2. UNE REGLEMENTATION RENFORCEE.....	29
3. VERS DE NOUVEAUX MODES DE PROTECTION DES CULTURES.....	31
4. LA PROTECTION INTEGREE DES CULTURES, UN PARADIGME ANCIEN, UN NOUVEAU CHAMP D' ACTIONS.....	32
4.1. DEFINITION DE LA PIC.....	33
4.2. CONCEPTS CLES ET INNOVATIONS POUR LA PIC.....	34
4.3. L'ADOPTION DE LA PIC : PERSPECTIVES ET LIMITES.....	37
CHAPITRE 2. UNE APPROCHE SYSTEMIQUE NECESSAIRE EN PROTECTION DES CULTURES.....	40
1. APERÇU DES RECHERCHES SUR LES APPROCHES SYSTEMIQUES EN PIC 40	

1.1.	ÉTUDES DECRIVANT LA RELATION SITUATION DE PRODUCTION-DEGATS	41
1.2.	ÉTUDES DECRIVANT LA RELATION DEGATS-DOMMAGES	42
1.3.	CONCLUSION PARTIELLE SUR L'ÉTAT DES LIEUX DE CETTE RECHERCHE.....	43
2.	ÉTAT DE L'ART DE LA MODELISATION EN PIC, LE CAS DE LA CULTURE DU BLE D'HIVER.....	44
CHAPITRE 3. LE BLE, UNE CULTURE A ENJEUX POUR L'AGRICULTURE DE DEMAIN		48
1.	UNE DENREE ALIMENTAIRE DE BASE AU CŒUR DES ENJEUX MONDIAUX.....	48
1.1.	PRODUCTION MONDIALE	48
1.2.	PRODUCTION EUROPEENNE ET FRANÇAISE.....	49
2.	RAPPEL SUR L'ECOPHYSIOLOGIE DU BLE	50
3.	UNE CULTURE SOUMISE A UN CORTEGE DE BIOAGRESSEURS.....	51
4.	MODES DE PRODUCTION ET DE PROTECTION	54
4.1.	LES PRATIQUES CULTURALES SUR LE BLE D'HIVER	54
4.2.	LES METHODES DE LUTTE ET LA CONSOMMATION DE PESTICIDES.....	55
4.2.1.	<i>La contribution du blé à la consommation de pesticides en France.....</i>	<i>55</i>
4.2.2.	<i>Les pratiques actuelles de protection sur blé.....</i>	<i>56</i>
5.	UN OBJET DE REFLEXION POUR LA PIC.....	60
CHAPITRE 4. DEMARCHE ADOPTEE POUR LA THESE		63
1.	LES OBJECTIFS DE LA THESE.....	63
2.	METHODE DE TRAVAIL	64
2.1.	SCHEMA CONCEPTUEL, HYPOTHESES DE TRAVAIL, METHODE DE MODELISATION .	64
2.2.	DEMARCHE DE CONSTRUCTION D'IPSIM.....	66
2.2.1.	<i>Bibliographie et expertise</i>	<i>66</i>
2.2.2.	<i>Construction du modèle sous DEXi.....</i>	<i>66</i>
2.2.3.	<i>Recueil des données</i>	<i>68</i>
2.2.4.	<i>Évaluation du modèle</i>	<i>69</i>
DEUXIÈME PARTIE. INJURY PROFILE SIMULATOR, A QUALITATIVE AGGREGATIVE MODELLING FRAMEWORK TO PREDICT CROP INJURY PROFILE AS A FUNCTION OF CROPPING PRACTICES, AND THE ABIOTIC AND BIOTIC ENVIRONMENT. I. CONCEPTUAL BASES		72
INJURY PROFILE SIMULATOR, A HIERARCHICAL AGGREGATIVE MODELLING FRAMEWORK TO PREDICT CROP INJURY PROFILE AS A FUNCTION OF		

**CROPPING PRACTICES, SOIL, CLIMATE AND FIELD ENVIRONMENT. I.
CONCEPTUAL BASES. 75**

1. INTRODUCTION	75
2. MATERIALS AND METHODS	78
2.1. BASIC PRINCIPLES OF IPSIM	78
2.2. IMPLEMENTATION OF IPSIM WITH A SOFTWARE PROGRAM.....	79
2.3. IPSIM STRUCTURE	80
2.3.1. <i>Structure of the attributes used to predict IP</i>	80
2.3.2. <i>Structure of the attributes used to predict the severity of a single pest</i> ...	84
2.3.3. <i>Typology of simulated Injury Profiles</i>	85
3. RESULTS.....	87
3.1. IMPLEMENTATION OF IPSIM GENERIC FRAMEWORK INTO A SIMULATION MODEL, AN EXAMPLE.....	87
3.2. SIMULATION SCENARIOS	88
3.3. SIMULATION RESULTS.....	89
4. DISCUSSION	91
4.1. POTENTIAL USES OF IPSIM MODELS.....	91
4.2. LIMITATIONS OF THE APPROACH	92
4.3. POINTS FOR REFLECTION.....	94
5. CONCLUSION	96

**TROISIEME PARTIE. APPLICATIONS D'IPSIM POUR LE BLE D'HIVER, IPSIM-
WHEAT 102**

**CHAPITRE 1. INJURY PROFILE SIMULATOR, A HIERARCHICAL AGGREGATIVE
MODELLING FRAMEWORK TO PREDICT AN INJURY PROFILE AS A FUNCTION
OF CROPPING PRACTICES, AND BIOTIC AND ABIOTIC ENVIRONMENT. PROOF
OF CONCEPT: DESIGN AND EVALUATION OF IPSIM-WHEAT-EYESPOT, A
MODEL THAT PREDICTS EYESPOT INJURIES ON
WINTER WHEAT. 104**

1. INTRODUCTION	105
2. MATERIALS AND METHODS	107
2.1. DESIGN OF IPSIM-WHEAT-EYESPOT	107
2.1.1. <i>General Approach</i>	107
2.1.2. <i>Identification and Organisation of Attributes</i>	108
2.1.3. <i>Definition of the Attribute Scales</i>	111
2.1.4. <i>Definition of Utility Functions</i>	113
2.1.5. <i>Attribute Weights</i>	115
2.1.6. <i>Simulations with DEXi</i>	117
2.2. EVALUATION OF THE PREDICTIVE QUALITY OF IPSIM-WHEAT-EYESPOT	118
2.2.1. <i>Description of the Dataset Used</i>	118

2.2.2. Evaluation of the Predictive Quality of IPSIM-Wheat-Eyespot.....	119
3. RESULTS.....	121
3.1. EVALUATION OF THE QUALITY OF PREDICTION FOR FINAL INCIDENCE CLASSES	121
3.2. EVALUATION OF THE QUALITY OF PREDICTION FOR FINAL INCIDENCE VALUES..	123
4. DISCUSSION	124
4.1. INTERESTS AND LIMITATIONS OF IPSIM-WHEAT-EYESPOT	124
4.1.1. Conceptual Basis of IPSIM-Wheat-Eyespot	124
4.1.2. Hierarchical Tree of Attributes and Utility Functions	125
4.1.3. Predictive Quality of IPSIM-Wheat-Eyespot	126
4.2. PROSPECTS	127
4.2.1. Improvements to the Model	127
4.2.2. Future Use of the Model	128

CHAPITRE 2. DESIGN AND EVALUATION OF IPSIM-WHEAT-BROWN RUST, A MODEL THAT PREDICTS BROWN RUST INJURIES ON WINTER WHEAT AS A FUNCTION OF CROPPING PRACTICES, SOIL, WEATHER, AND FIELD ENVIRONMENT

1. INTRODUCTION.....	137
2. MATERIALS AND METHODS.....	140
2.1. DESIGN OF IPSIM-WHEAT-BROWN RUST.....	140
2.1.1. General Approach.....	140
2.1.2. Identification and Organisation of Attributes	141
2.1.3. Definition of the Attribute Scales.....	147
2.1.4. Definition of Aggregative tables	149
2.1.5. Attribute Weights	150
2.1.6. Simulations with DEXi.....	151
2.2. EVALUATION OF THE PREDICTIVE QUALITY OF IPSIM-WHEAT-BROWN RUST ...	152
2.2.1. Description of the Dataset Used	152
2.2.2. Evaluation of the Predictive Quality of IPSIM-Wheat-Brown Rust	154
3. RESULTS.....	155
3.1. EVALUATION OF THE QUALITY OF PREDICTION FOR FINAL SEVERITY CLASSES .	155
3.2. EVALUATION OF THE QUALITY OF PREDICTION FOR FINAL INCIDENCE VALUES..	157
4. DISCUSSION	158
4.1. VALUE AND LIMITATIONS OF IPSIM-WHEAT-BROWN RUST	158
4.1.1. Conceptual scheme of IPSIM-Wheat-Brown Rust.....	158
4.1.2. Identification of attributes and Aggregative tables	159
4.1.3. Predictive quality of IPSIM-Wheat-Brown Rust.....	161
4.2. PROSPECTS	161

CHAPITRE 3. AUTRES MODELES EN CONSTRUCTION

1. IPSIM-WHEAT-SEPTORIA TRITICI	163
1.1. EPIDEMIOLOGIE DE LA MALADIE	164
1.2. MODELES DISPONIBLES SUR <i>SEPTORIA TRITICI</i>	165
1.3. EFFETS DES PRATIQUES CULTURALES, DU PEDOCLIMAT ET DE L'ENVIRONNEMENT DE LA PARCELLE, LES 3 ENTREES DU MODELE IPSIM-WHEAT-SEPTORIA TRITICI	166
1.3.1. <i>Effet des pratiques culturales</i>	167
1.3.2. <i>L'environnement de la parcelle</i>	171
1.3.3. <i>L'effet du pédoclimat</i>	172
1.4. CONSTRUCTION DU MODELE IPSIM-WHEAT- <i>SEPTORIA TRITICI</i>	173
2. IPSIM-WHEAT-FUSARIUM AND IPSIM-WHEAT-MYCOTOXINS	175
2.1. EPIDEMIOLOGIE DE LA MALADIE	175
2.2. EFFET DES PRATIQUES CULTURALES, DU PEDOCLIMAT ET DE L'ENVIRONNEMENT DE LA PARCELLE SUR LA SEVERITE DE LA FUSARIOSE ET LA CONTAMINATION EN DON	177
2.2.1. <i>Les pratiques culturales</i>	177
2.2.2. <i>Le pédoclimat</i>	181
2.2.3. <i>L'environnement de la parcelle</i>	182
2.3. LA MODELISATION DE LA FUSARIOSE ET DES MYCOTOXINES	182
2.4. CONSTRUCTION ET VALIDATION DES MODELES IPSIM-WHEAT-FUSARIUM AND IPSIM-WHEAT-MYCOTOXINS	183
3. IPSIM-WHEAT-POWDERY MILDEW	185
4. IPSIM-WHEAT-APHIDS.....	185
4.1. ELEMENTS D'EPIDEMIOLOGIE ET CHOIX DES VARIABLES D'ENTREE DU MODELE .	185
4.2. CONSTRUCTION DU MODELE IPSIM-WHEAT-APHIDS	188
5. IPSIM-WHEAT-WEEDS	189
5.1. CONSTRUCTION DU MODELE	190
5.1.1. <i>Identification des principales adventices et regroupement en traits fonctionnels</i>	190
5.1.2. <i>Etudes des facteurs favorisant le développement des adventices et conception du modèle</i>	194
5.1.3. <i>Discussion</i>	196

CHAPITRE 4. ELEMENTS DE SYNTHESE : PROPOSITION D'UNE VERSION INITIALE DU MODELE IPSIM-WHEAT, PERMETTANT DE PREDIRE LE PROFIL DE DEGATS SUR BLE D'HIVER EN FONCTION DES PRATIQUES CULTURALES, DU PEDOCLIMAT ET DE L'ENVIRONNEMENT DE LA PARCELLE..... 200

1. RAPPEL SUR LA CONSTRUCTION DU MODELE FINAL.....	200
2. APPLICATION DU MODELE IPSIM-WHEAT DANS UNE SITUATION DE PRODUCTION DONNEE	201
2.1. APPLICATION D'IPSIM-WHEAT POUR UNE SITUATION DE PRODUCTION A DEGATS DE ROUILLE BRUNE/FUSARIOSE (SUD-OUEST DE LA FRANCE)	202
2.1.1. <i>Analyse de l'interaction rouille brune/fusariose</i>	202
2.1.2. <i>Modélisation du profil de dégâts rouille brune/fusariose dans une situation donnée</i>	203

2.2.	APPLICATION D'IPSIM-WHEAT A UNE SITUATION DE PRODUCTION A DEGATS DE ROUILLE BRUNE/SEPTORIOSE DANS LE SUD-OUEST DE LA FRANCE	207
2.2.1.	<i>Analyse de l'interaction rouille brune/septoriose</i>	207
2.2.2.	<i>Modélisation du profil de dégâts rouille brune/septoriose dans une situation donnée</i>	208
2.3.	APPLICATION D'IPSIM-WHEAT POUR UNE SITUATION DE PRODUCTION AVEC INCIDENCE DE DEGATS DE 3 MALADIES : ROUILLE BRUNE/SEPTORIOSE/FUSARIOSE DANS LE SUD-OUEST DE LA FRANCE	210
QUATRIEME PARTIE. DISCUSSION ET PERSPECTIVES		213
1.	ORIGINALITES, INTERETS ET LIMITES DE IPSIM-WHEAT	214
2.	L'APPROCHE SYSTEMIQUE, UNE INNOVATION NECESSAIRE EN PIC ..	218
3.	APPLICATIONS EN PRATIQUE ET PERSPECTIVES SCIENTIFIQUES	219
4.	COUPLAGE AVEC D'AUTRES MODELES : POUR UNE CONCEPTION DE SYSTEMES DE CULTURE MOINS SENSIBLES AUX PRESSIONS BIOTIQUES	221
CONCLUSION		224
REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES		226
SOMMAIRE DES ANNEXES		251

TABLE DES ILLUSTRATIONS

Figure 1 : Diagramme organisationnel de la thèse	22
Figure 2 : Relations entre bioagresseurs, dégâts, dommages et pertes (d'après Savary, 1995)	26
Figure 3 : Les différentes méthodes de contrôle ou de lutte contre les bioagresseurs (Aubertot, 2005).....	34
Figure 4 : leviers de gestion des bioagresseurs (Aubertot et al. 2011)	36
Figure 5 : concept de performances potentielles, accessibles, réelles et facteurs déterminants d'un rendement (d'après Rabbinge, 1989).....	42
Figure 6 : Répartition des dégâts de bioagresseurs selon les stades de développement du blé (Echelle de Zadoks et de Feekes).....	53
Figure 7 : Contribution moyenne à la pression d'utilisation des pesticides et surfaces cultivées correspondant à l'assolement des cultures en 2006 (INRA, 2009)	55
Figure 8 : Contribution des différentes céréales à l'utilisation des produits phytosanitaires (INRA, 2009).....	56
Figure 9 : Nombre moyen de traitements phytosanitaires en fonction des rendements régionaux (Agreste, 2013d)	58
Figure 10 : intensité des traitements fongicides en fonction des régions françaises	59
Figure 11 : Couplage d'IPSIM avec un modèle de nuisibilité	65
Figure 12 : Schematic representation of an agroecosystem and its drivers. In grey: components defining the Production Situation. The IP is the output variable of IPSIM, whereas its input variables are included within the three following components: CP, field environment, and physical, chemical and biological components of the field. * Not taken into account in IPSIM.	78
Figure 13 : Overall output attributes of IPSIM: description of an IP (screenshot of the DEXi software). For the sake of simplicity, only 3 pests are represented in this figure. The severity of a given pest is first calculated independently by IPSIM as if no other pest was present. The aggregated severity of a given pest is then calculated by taking into account the combined effects of all other pests. This is done by considering the theoretical effect of one pest on another according to five levels: high facilitation, low facilitation, no effect, low reduction, high reduction.	81
Figure 14 : Hierarchical sub-tree to predict the severity of a single pest without any interaction with other pests (screenshot of the DEXi software).....	85
Figure 15 : Example of simulation outputs for wheat obtained for three cropping systems (intensive, integrated and organic) in a given production situation (screenshot of the DEXi software). Three pests in interaction were taken into account in these simulations: eyespot, sharp eyespot and Brown Rust.....	89
Figure 16 : Typology of injuries caused by multiple pests on a crop for given Cropping Practices in a given Production Situation using nine generic Injury Profiles (IP1-IP9). These Injury Profiles are determined by the final levels of the injuries caused by slightly and highly endocyclic pests (plant pathogens, Weeds and animal pests). They can be used to perform cross-cutting analyses for a wide range of agricultural productions.....	90
Figure 17 : Hierarchical structure of IPSIM-Wheat-Eyespot (screenshot of the DEXi software). Bolded and non-bold terms represent aggregated and basic attributes, respectively.....	109

Figure 18 : Attribute scales of IPSIM-Wheat-Eyespot (screenshot of the DEXi software). All the scales are ordered from values detrimental to the crop (i.e. favourable to eyespot) on the left-hand side to values beneficial to the crop on the right-hand side (i.e. unfavourable to eyespot). In the DEXi software, this difference is clearly visible because, by convention, values beneficial to the user are coloured in green, detrimental in red, and neutral in black.....	113
Figure 19 : Utility function for the "Mitigation through crop status" aggregated attribute (screenshot of the DEXi software). Aggregation rules for the 18 possible combinations of the 3 cultivar choices, the 2 levels of fertilisation and the 3 sowing rates.....	114
Figure 20 : Example of 2 simulations carried out with IPSIM-Wheat-Eyespot (screenshot of the DEXi software).	117
Figure 21 : Evaluation of the predictive quality of IPSIM-Wheat-Eyespot. Residuals distribution: number of classes of difference between observed and simulated final eyespot classes (0-20%, 20-40%, 40-60%, 60-80%, 80-100%; 526 fields, over 9 years and 19 French regions).....	122
Figure 22 : Evaluation of the predictive quality of IPSIM-Wheat-Eyespot Distribution of class differences between observed and predicted final eyespot incidences (526 fields, over 9 years and 19 French regions).....	123
Figure 23 : Hierarchical structure of IPSIM-Wheat-Brown Rust. Bold and non-bold terms represent aggregated and basic attributes, respectively.....	141
Figure 24 : Attribute scales of IPSIM-Wheat-Brown Rust. All the scales are ordered from values favourable to Brown Rust (i.e. detrimental to the crop) on the left-hand side to values unfavourable to Brown Rust on the right-hand side (i.e. beneficial to the crop). In the DEXi software, this difference is clearly visible because, by convention, values beneficial to the user are coloured in green, detrimental in red, and neutral in black.	149
Figure 25 : Aggregative table for the "Mitigation through crop status" aggregated attribute. Aggregation rules (for the 18 possible combinations of 3 cultivar choices, 2 levels of fertilisation and 3 sowing rates) and the resulting weights for each input attribute.....	150
Figure 26 : Example of 2 simulations carried out with IPSIM-Wheat-Brown Rust (screenshot of the DEXi software).	151
Figure 27 : Evaluation of the predictive quality of IPSIM-Wheat- Brown Rust. Residuals distribution: number of classes of difference between observed and simulated final Brown Rust classes (0-20%, 20-40%, 40-60%, 60-80%, 80-100%; 1045 fields, over 15 years and 19 French regions).....	156
Figure 28 : Evaluation of the predictive quality of IPSIM-Wheat-Brown Rust. Distribution of class differences between observed and predicted final Brown Rust severities. (1045 fields, over 15 years and 19 French regions).	157
Figure 29 : Structure hiérarchique du modèle IPSIM-Wheat- <i>Septoria tritici</i>	174
Figure 30 : Echelles attribuées aux attributs de base et d'agrégation.....	174
Figure 31 : Structure générale des modèles IPSIM Fusariose et IPSIM Don	184
Figure 32 : Graphique représentant la distribution des écarts entre valeurs simulées et	184
Figure 33 : Structure d'IPSIM-Wheat, rouille brune/fusariose en interaction.....	204
Figure 34 : Structure d'IPSIM-Wheat, rouille brune/fusariose en interaction et niveau d'endocyclisme	204
Figure 35 : Exemple de simulations d'IPSIM-Wheat rouille brune/fusariose pour trois systèmes de culture.....	206

Figure 36 : Structure d'IPSIM-Wheat, rouille brune/septoriose en interaction.....	208
Figure 37 : Structure d'IPSIM-Wheat, rouille brune/septoriose en interaction.....	209
Figure 38 : Exemple de simulations d'IPSIM-Wheat rouille brune/septoriose pour trois systèmes de culture	210
Figure 39 : Structure d'IPSIM-Wheat, fusariose/rouille brune/septoriose en interaction	211
Figure 40 : Couplage d'IPSIM-Wheat avec d'autres modèles.....	223

SOMMAIRE DES TABLEAUX

Tableau 1 : Stratégies de gestion des bioagresseurs selon Aubertot et al. (2011) ..	35
Tableau 2 : Raisonnement des méthodes de protection intégrée (d'après Lucas et Meynard, 2000)	37
Tableau 3 : les pratiques culturales sur le blé en 2011. (Agreste, 2013c).....	54
Tableau 4 : les niveaux de références retenus et les stratégies sur lesquels ils se fondent (INRA, 2009).....	61
Tableau 5 : Exemples de traduction de variables fournies en variables qualitatives pour quelques attributs d'entrée	70
Tableau 6 : Generic utility function used to represent the effect of one pest on another in IPSIM.....	81
Tableau 7 : Generic utility function used to calculate the overall effect on a given pest caused by all the other pests in an IP.....	82
Tableau 8 : Generic utility function used to calculate the severity of one pest in interaction with the other pests of an IP.....	83
Tableau 9 : Generic utility function used to define the level of severity of slightly endocyclic pests in an Injury Profile as a function of the final injury level of single pests. The same utility function is used to define the level of severity of highly endocyclic pests.	87
Tableau 10 : Equivalence between features of qualitative models developed within the IPSIM framework and quantitative simulation models.	95
Tableau 11 : Available knowledge in the scientific literature describing the effects of Cropping Practices and the Production Situation on the incidence of eyespot on wheat. Cropping practices and climate can be favourable (+), unfavourable (-) or neutral (0) to the development of eyespot. The intensity of the considered factor is summarised with 4 classes: 0, no effect; +, slight; ++, significant; +++, crucial	115
Tableau 12 : Respective weights of the attributes of IPSIM-Wheat-eyespot. The "local" and "global" weights are calculated for each aggregated attribute separately and are distributed in 3 levels of aggregation. Bold and non-bold terms represent basic attributes and aggregated terms, respectively.....	116
Tableau 13 : Main features of the datasets used for the evaluation of IPSIM-Wheat-Eyespot's predictive quality.	119
Tableau 14 : Main features of the datasets used for the evaluation of the predictive quality of IPSIM-Wheat-Brown Rust.	153
Tableau 15 : Sélection des principales adventices du blé selon leur fréquence et leur nuisibilité (en gras les adventices les plus fréquentes (Marti, 2013).	192
Tableau 16 : Moyens agronomiques utilisables selon les traits retenus des adventices (Marti, 2013)	193
Tableau 17 : Présentation des 5 groupes fonctionnels mis en évidence (Marti, 2013)	194

GLOSSAIRE

Allo-inoculum: inoculum à l'origine d'une épidémie mais provenant d'un autre espace que celui où l'épidémie est observée.

Atténuation en culture: stratégie ayant pour objectif de minimiser les dégâts g lorsque la culture et le bioagresseur se trouvent en contact. Ce processus agit via une modification de l'état du peuplement : il s'agit d'augmenter la compétitivité de la culture et d'éviter les conditions favorables au développement et à la propagation du ou des bioagresseurs g en jouant sur les dates et densités de semis, sur la fertilisation, sur l'irrigation, et en mettant en œuvre des associations d'espèces et de variétés.

Contamination : présence anormale de substances ou de micro-organismes dans un compartiment de l'environnement.

Contrôle culturel : englobe tous les moyens de contrôle autres que la lutte chimique g, la lutte biologique g, le contrôle génétique g et le contrôle physique g. Il consiste à adapter le système de culture g afin de limiter les dommages g dus aux bioagresseurs et fait pour cela appel notamment à des modifications des rotations, de la date et de la densité de semis de ces cultures, à une gestion appropriée de la fertilisation et à la gestion du travail du sol.

Contrôle génétique : consiste à utiliser des plantes sélectionnées pour leur résistance, leur tolérance ou leurs caractéristiques physiologiques pour maîtriser les bioagresseurs.

Dégât: symptôme observé sur le peuplement cultivé, il est causé par un ou plusieurs bioagresseurs.

Domage : perte quantitative ou qualitative sur le produit récolté.

Endocyclique : fait référence à un organisme dont le cycle est fortement inféodé à la parcelle et dont le développement est très dépendant de l'endo-inoculum. Le niveau d'endocyclisme résulte de la combinaison de deux caractéristiques : la persistance de l'endo-inoculum dans la parcelle et sa capacité de dispersion (Aubertot et Robin, 2013).

Endo-inoculum : inoculum à l'origine d'une épidémie et présent initialement dans l'espace où l'épidémie est observée.

Evitement : stratégie consistant à éviter la concordance entre la phase de contamination du bioagresseur et la période de sensibilité de la culture. Le principal levier est le raisonnement de la date de semis, à coupler avec un choix de variétés adéquat.

Incidence : fréquence d'individus (plantes ou organes) atteints par un dégât sur l'ensemble des individus d'une parcelle.

Inoculum : terme générique qui caractérise tout élément du parasite capable de contaminer un hôte. L'inoculum primaire (x_0) permet la maladie et initie l'épidémie. L'inoculum secondaire (x_n) assure la progression de l'épidémie.

Itinéraire technique : combinaison logique et ordonnée des techniques mises en oeuvre sur une parcelle agricole en vue d'obtenir une production.

Lutte biologique : consiste à utiliser des organismes vivants pour prévenir ou réduire les dommages causés par des bioagresseurs.

Lutte chimique : consiste à utiliser des produits phytosanitaires pour la protection des cultures.

Lutte physique : consiste à utiliser des moyens mécaniques, thermiques, électromagnétiques ou pneumatiques pour le contrôle des bioagresseurs.

Monocyclique : (dynamique de développement) : une seule phase de multiplication du bioagresseur a lieu durant la saison de végétation.

Polycyclique : (dynamique de développement) plusieurs phases de multiplication du bioagresseur ont lieu durant la saison de végétation.

Pollution : présence de substances au-delà d'un seuil pour lequel des effets négatifs sont susceptibles de se produire.

Polyéticque : se dit d'une épidémie dont les générations du parasite sont récurrentes d'une année de végétation à l'autre.

Prophylaxie : Ensemble des mesures physiques, variétales, culturales... tendant à empêcher l'apparition de bioagresseurs ou à en minimiser les effets.

Seuils d'intervention ou de tolérance : exprime une densité de population de bioagresseurs dont le dépassement demande une intervention limitante, faute de quoi la culture risque de subir des pertes supérieures au coût de la mesure envisagée.

Sévérité : pourcentage de surface atteinte sur un individu subissant un dégât.

Situation de production : une situation de production est définie par un ensemble de variables décrivant les composantes physiques, chimiques et biologique d'une parcelle, et le contexte socio-économique associé (Aubertot et Robin, 2013).

Solution de rattrapage : Une solution de rattrapage est un levier de maîtrise des bioagresseurs mobilisable en dernier recours dans les situations où les autres leviers mis en œuvre n'ont pas donné de résultats suffisants. Il peut s'agir de lutte chimique de rattrapage ou de désherbage mécanique par exemple.

Substance active : toute substance ou micro-organisme, y compris les virus exerçant une action générale ou spécifique, sur les organismes nuisibles ou sur les végétaux, parties de végétaux ou produits végétaux. Les substances sont définies comme les éléments chimiques et leurs composés tels qu'ils se présentent à l'état naturel ou tels que produits par l'industrie, incluant toute impureté résultant inévitablement du procédé de fabrication. Les végétaux sont les plantes vivantes et les parties vivantes de plantes, y compris les fruits frais et les semences (directive 91/414/CEE du 15 juillet 1991).

PS : Plusieurs définitions sont issues du guide STE'Phy (AUBERTOT *et al.*, 2011)

TABLE DES SIGLES ET DES ABREVIATIONS

AB : Agriculture biologique

AGPB : Association générale des producteurs de blé

AMM : Autorisation de mise sur le marché

ANR : Agence nationale de la recherche

CEMAGREF : Institut de recherche en sciences et technologies pour l'environnement

CETIOM : Centre technique interprofessionnel des oléagineux métropolitains

CORPEN : Comité d'orientation pour des pratiques agricoles respectueuses de l'environnement

CP : Cropping Practices

EDP : Equivalent Dose pleine

EIPurpan : Ecole d'Ingénieurs de Purpan

FHB : *Fusarium* head blight

FNAB : Fédération nationale d'agriculture biologique

FREDEC : Fédération régionale de défense contre les organismes nuisibles des cultures

GEVES : Groupe d'études et de contrôle des variétés et des semences

GRAB : groupe de recherche en agriculture biologique

IFEN : Institut français de l'environnement

IFT : indice de fréquence de traitement

INP : Institut national polytechnique

INRA: Institut national de la recherche agronomique

ICM: Integrated crop management

IPSIM: Injury Profile Simulator

IPM : Integrated Pest Management

ITAB: Institut technique de l'Agriculture Biologique

ITK : Itinéraire technique

MAESTRIA : Mise Au point et Évaluation des Systèmes de culture Économiques en intrants et durables

MAAF : Ministère de l'agriculture, de l'Agroalimentaire et de la Forêt

MIC MAC Design : Modeling for Integrated Crop Management in low input farming, Assessment and Cropping system Design

OAD: Outils d'aide à la décision

OILB : Organisation internationale de lutte biologique et intégrée contre les animaux et les plantes nuisibles

ONEMA : Office national de l'eau et des milieux aquatiques

ONIGC : Office national interprofessionnel des grandes cultures (FranceAgrimer)

PFI : Production fruitière intégrée

PIC : Protection Intégrée des cultures

PS : Production Situation

RMT : Réseaux mixtes technologiques

SAU : Surface agricole utile

SCEES : Service central d'enquêtes et d'études statistiques

SdC : Système de culture

SdCi : Systèmes de culture innovants

SRPV : Services régionaux de la protection des végétaux

SP : Situation de Production

TCS : Technique culturale simplifiée

TTSI : Technique très simplifiée d'implantation

UIPP : Union des industries de la protection des plantes

VAT : Valeur agronomique et technologique

INTRODUCTION

L'agriculture du troisième millénaire fait face à un nouveau paradigme résumé par CAPILLON (2007) : « concilier environnement et productivité ». Face à l'augmentation de la population mondiale et à la limitation des terres agricoles disponibles, la productivité agricole apparaît comme un des facteurs nécessaires pour remplir les objectifs de Sécurité alimentaire fixés lors du sommet mondial de l'alimentation à Rome en 1996 (FAO, 2003). Dans le même temps, l'avènement du « développement durable », défini en 1987 dans le rapport H.G Brundtland, amorce un nouveau cycle de réflexions sur les modes de production agricole jusqu'alors usités.

Si les technologies déployées ces soixante dernières années ont permis d'augmenter et de stabiliser les rendements des cultures, le modèle intensif prédominant est aujourd'hui remis en question (EICSTAD, 2008). Tout d'abord, il repose sur une utilisation importante d'énergie fossile et d'intrants chimiques. Dans un contexte de raréfaction des ressources fossiles et donc de hausse des prix du pétrole et des intrants, ce modèle entrevoit ces limites. Ensuite, des préoccupations sociétales émergent concernant les effets néfastes de l'agriculture intensive sur la santé humaine et les composantes de l'environnement.

La dynamique de réduction d'usage des pesticides, engagée au niveau européen est une illustration de cette prise de conscience collective. En France, le Grenelle de l'Environnement lancé en 2007 réaffirme la nécessité de réduire l'utilisation des pesticides et découle sur des décisions politiques et réglementaires. Le plan Ecophyto adopté par le Ministère de l'Agriculture et de la Pêche, vise ainsi à réduire de 50% l'usage des pesticides (sur la base de l'Indice de Fréquence de Traitement) d'ici 2018, sous réserve de la mise en œuvre par la recherche de solutions alternatives non chimiques.

Dans ce contexte, la protection des cultures apparaît comme un enjeu majeur. D'après DEGUINE *et al.* (2008), les systèmes de protection actuels ne réduisent que partiellement les pertes potentielles occasionnées par les organismes nuisibles des cultures, révélant ainsi une marge de progrès. D'autre part, la conception et l'évaluation de nouvelles méthodes de protection phytosanitaires alternatives au « tout chimique » apparaissent nécessaires, pour répondre aux exigences agronomiques, et environnementales. Plusieurs méthodes à effet partiel peuvent se combiner dans le cadre de la Protection Intégrée des Cultures (PIC) :

Le contrôle cultural (adaptation des pratiques en vue de défavoriser le développement des populations de bioagresseurs), le contrôle génétique (choix de variétés présentant des caractéristiques de résistance ou de tolérance), la lutte biologique (utilisation d'agents biologiques vivants pour limiter ou réduire les ennemis des cultures), et la lutte physique (telle que la lutte mécanique contre les mauvaises herbes) (FERRON, 1999).

La Protection Intégrée des Cultures, fait l'objet de réflexions actives au niveau international. Cependant, son adoption en grandes cultures est freinée car elle se heurte, entre autres, à des difficultés techniques. En effet, il est très difficile d'appréhender les impacts d'un ensemble de méthodes sur les bioagresseurs (ravageurs, adventices, maladies). De plus, la combinaison des pratiques culturales au sein d'un itinéraire technique puis d'un système de culture met en jeu plusieurs interactions. En définitive, on se doit de considérer une multitude de relations entre système de culture, milieu climatique et édaphique, peuplement, et communautés de bioagresseurs.

Les études portant sur ce sujet privilégient généralement une approche mono-spécifique : on étudie les effets de plusieurs pratiques culturales sur un seul bioagresseur ou alors l'effet d'une pratique culturale sur plusieurs bioagresseurs. De même, les travaux de modélisation intègrent rarement la multiplicité des organismes nuisibles et encore moins les effets des pratiques culturales sur ces derniers (AUBERTOT *et al.*, 2005). Or, afin d'assurer un transfert de connaissance vers la sphère du développement, une approche pluri-spécifique doit être menée, car les agriculteurs ont eux à gérer un ensemble de bioagresseurs.

Dans ce contexte, le projet de cette thèse se propose d'étudier les relations entre l'ensemble des pratiques culturales et l'ensemble des bioagresseurs majeurs du blé, culture à forts enjeux mondiaux et forte consommatrice de pesticides. Il aboutira à la mise au point d'un modèle qualitatif décrivant de manière simplifiée ces relations : IPSIM Wheat.

La première partie de ce mémoire, permettra de revenir sur le contexte bibliographique de l'étude portant sur des aspects social, économique et scientifique.

Les bases du concept de modélisation seront exposées dans la seconde partie et la construction du modèle générique IPSIM sera décrite.

La troisième partie sera dédiée aux applications du concept IPSIM en décrivant différents sous-modèles d'IPSIM-Wheat construits à ce jour pour quelques bioagresseurs majeurs du blé ; une première version du modèle complet sera également présentée.

Enfin, dans une quatrième partie les intérêts et limites de notre modèle seront discutés, des propositions seront formulées pour l'améliorer et des perspectives concernant son utilisation également avancées (**Figure 1**).

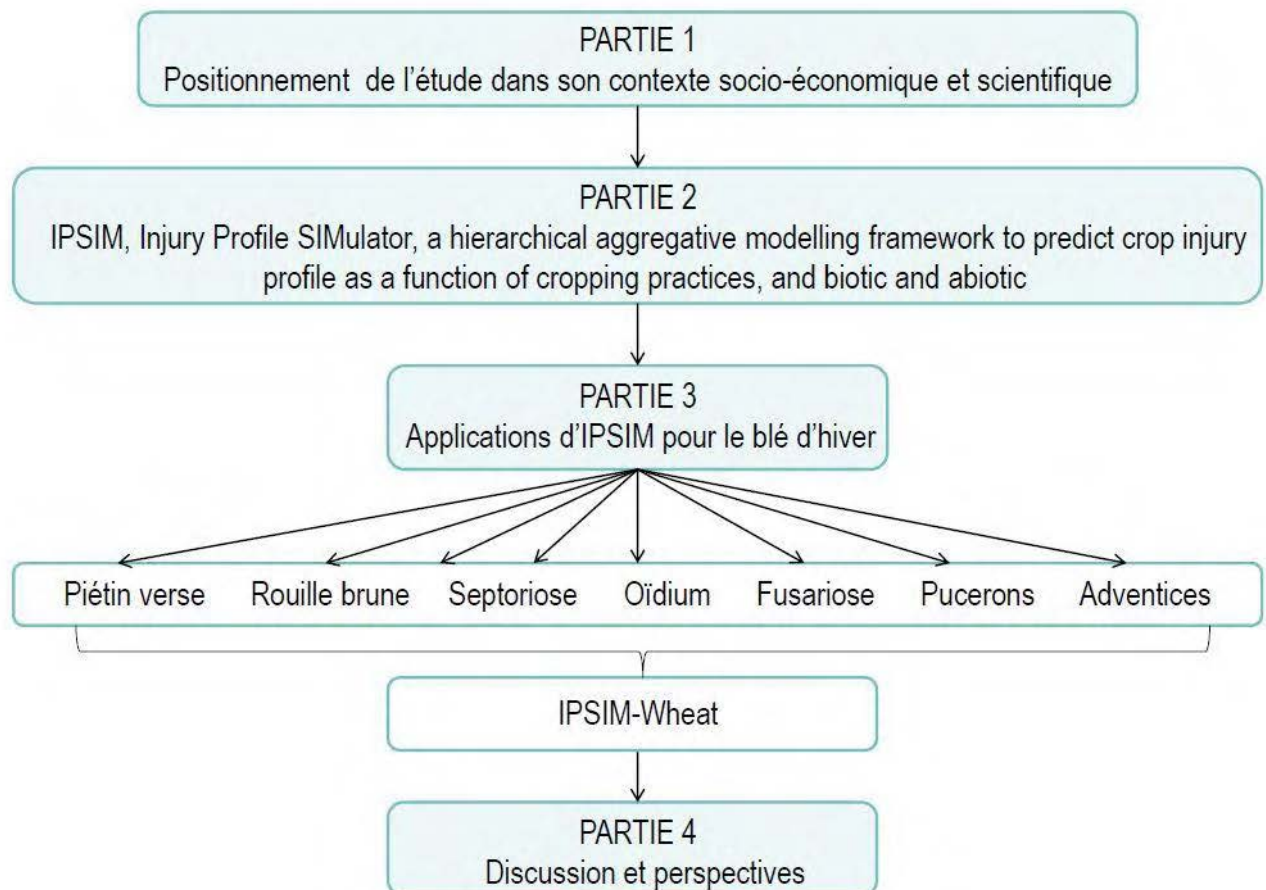


Figure 1 : Diagramme organisationnel de la thèse

Première partie. Positionnement de
l'étude dans son contexte socio-
économique et scientifique

Chapitre 1. La protection des cultures face aux nouveaux enjeux agricoles de production et de préservation de l'environnement

1. La protection des cultures, une nécessité

De 2007 à 2009, la flambée des prix des aliments, qui a été suivie d'une crise financière, puis d'une récession économique mondiale, a déterminé une augmentation du nombre de personnes souffrant de faim et de sous-alimentation dans le monde, qui a atteint un niveau sans précédent, pour culminer à plus d'un milliard en 2009 (FAO, 2012).

Si cette crise alimentaire peut sembler derrière nous, la question de la sécurité alimentaire se pose toujours de manière cruciale. Les *Objectifs du Millénaire* pour 2015 fixés par l'ONU, visent à réduire de moitié la proportion de populations vivant dans l'extrême pauvreté et souffrant de la faim, sans négliger ses impacts sur l'environnement et en ayant soin de contribuer au développement économique et social des populations (ONU, 2000).

Réduire de moitié d'ici 2015 la proportion de ces populations, alors même que les projections démographiques annoncent 9 à 11 milliards d'humains à nourrir en 2050, passe par l'investissement dans l'agriculture mais sans négliger ses impacts sur l'environnement et en ayant soin de contribuer au développement économique et social des populations. Outre l'aspect quantitatif, les problèmes de pollution, de sauvegarde de la biodiversité et de changement climatique impliquent des réflexions et des adaptations des systèmes actuels sur le long terme (Doré et Rechauchère, 2010). De nombreux colloques et ouvrages ont été consacrés aux questions liant agriculture et alimentation et un rapport de la banque mondiale en témoigne également (Banque mondiale, 2008) en affirmant très clairement la nécessité de réinvestir dans l'agriculture pour lutter contre la pauvreté.

Le problème ne vient pas tant de la quantité de nourriture disponible – les agriculteurs en produisent suffisamment pour répondre aux besoins de la population mondiale – que de sa répartition inégale et de l'escalade des prix. En 2050,

cependant, le défi aura pris une tout autre tournure à cause de la croissance démographique, certes, mais aussi de l'augmentation du niveau de vie pour bon nombre de personnes, qui devrait entraîner une hausse de la consommation, en particulier de viande, sans oublier l'utilisation croissante de terres arables pour l'urbanisation, la recherche de matières premières ou la production de biocarburants. Ainsi, même si l'on résout aujourd'hui les problèmes de pauvreté et d'accès aux ressources, il faudra produire presque deux fois plus pour assurer un approvisionnement mondial suffisant en 2050 (FAO, 2009). La production annuelle de céréales devra atteindre 3 milliards de tonnes environ comparée aux 2.1 milliards actuels et tout en étant une activité durable vis-à-vis de la préservation de l'environnement (FAO, 2009).

Nourrir la planète en 2050 semble possible : cela pourrait se faire dans le cadre d'un développement durable des systèmes alimentaires et agricoles mondiaux. Il repose sur trois inflexions majeures, à savoir la réduction des consommations alimentaires excessives et des gaspillages, le développement d'une agronomie écologiquement intensive et la sécurisation des échanges internationaux de produits agricoles et agroalimentaires (INRA-CIRAD, 2009).

Des pratiques agronomiques repensées pour une production plus durable vont donc participer à relever ce défi et parmi elles, la protection des cultures dont un des enjeux majeurs aujourd'hui est de contribuer à atteindre ces deux objectifs, de produire plus et mieux.

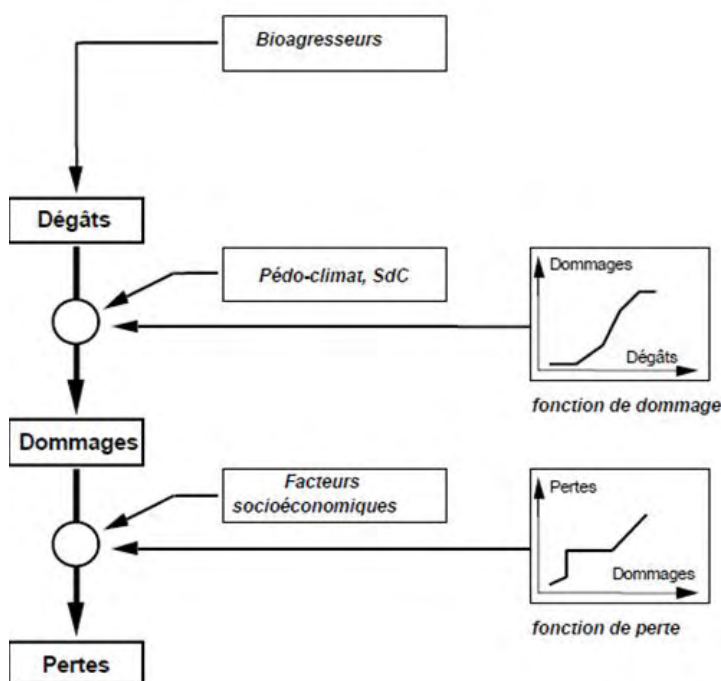
1.1. Réduire les pertes, une nécessité

Depuis la naissance de l'agriculture, il y a plus de 10000 ans, les agriculteurs ont dû lutter contre des organismes nuisibles aux cultures et aux denrées stockées, désignés récemment sous le terme de « bioagresseurs ».

Compte tenu de la diversité et de la complexité du cycle de vie des bioagresseurs, il importe de bien définir au préalable les termes permettant de les décrire et les classer. On peut ainsi distinguer (Deguine, 2008) :

- Les agents pathogènes : tout micro-organisme (bactérie, champignon, mycoplasme, virus) capable de provoquer une pathologie chez une plante hôte.
- Les ravageurs : tout animal phytophage capable de provoquer des dégâts sur une plante (ex. insecte, acarien, mollusque, nématode, mammifère)
- Les adventices : toute plante qui accompagne une espèce cultivée et dont la présence n'est pas souhaitée. Synonyme de « mauvaise herbe », elle exerce une action défavorable sur la culture.

De plus, il est important de distinguer les notions de dégât, dommage et perte. Le dégât est l'observation de l'impact d'une population de bioagresseurs sur une culture (symptômes observés). On entend par dommage une perte de récolte, quantitative ou qualitative, due à l'activité d'un bioagresseur donné. La notion de perte fait quant à elle référence à la perte économique engendrée par les dommages (**Figure 2**). Le dégât n'entraîne pas forcément de dommage, ni de perte, puisque cela dépend du lien entre ces dégâts et la phase d'élaboration du rendement et de la qualité d'une culture. De la même façon, le dommage n'induit pas systématiquement de perte économique (Zadoks, 1993).



Une dynamique de bioagresseurs (une 'épidémie', au sens générique)

- peut, ou non, provoquer des dégâts dans un peuplement,
- qui peuvent, ou non, causer un dommage (des pertes de récolte),
- qui peuvent, ou non, causer une perte (des pertes économiques).

Figure 2 : Relations entre bioagresseurs, dégâts, dommages et pertes (d'après Savary, 1995)

Comme pour les causes abiotiques (liées au sol ou au climat), ces bioagresseurs peuvent engendrer des dommages et réduire considérablement la production agricole. Ainsi les pertes totales de récolte dues aux pressions biotiques, en l'absence de toute protection varient d'environ 50% pour le blé à plus de 80% pour la production de riz (Oerke, 2006). Ces pertes ne sont que partiellement réduites par les systèmes de protection (de 34 à 38% pour le blé selon les régions) et 29% de la production mondiale de blé seraient actuellement perdus (Oerke, 2006).

Ces valeurs sont considérables et insupportables dans le contexte de pénurie mondiale, il apparaît donc plus que nécessaire de protéger les cultures et de réduire au plus vite la marge de progrès qui persiste.

1.2. Historique de la protection des cultures

La protection des cultures est une préoccupation ancestrale depuis les premiers peuples agricoles. Des extraits de plante étaient utilisés avant notre ère pour protéger les stocks de grains et des procédés de lutte biologique étaient déjà utilisés dans les vergers chinois au huitième siècle. Les stratégies de protection sont alors essentiellement basées sur la lutte mécanique et biologique. Au cours du XIX^{ème} siècle, les bioagresseurs véhiculés par l'expansion commerciale ont provoqué une succession d'événements dramatiques pour les récoltes et les populations renforçant le besoin de protection. Au sortir de la seconde guerre mondiale, la mise sur le marché des substances de synthèse engendre un nouvel espoir de lutte directe et d'extermination. Leur performance immédiate et leur facilité d'emploi laissaient alors à penser que l'homme pouvait réussir à contrôler la Nature. Accueillies avec enthousiasme par la société, ces découvertes furent saluées par un prix Nobel de médecine à Paul Müller pour ses travaux sur les propriétés insecticides du DDT en 1948. C'est en effet une révolution technique globale de l'agriculture qui s'est produite et qui a participé à l'augmentation des rendements, à la stabilisation de la production agricole mondiale, à la maîtrise des ressources alimentaires et l'amélioration de la santé publique (Tilman et al., 2002). Mais au cours des années 1950 et 1960, en dépit de succès considérables, cette primauté donnée à la lutte chimique a été questionnée.

2. Utilisation massive des pesticides et conséquences

La lutte chimique est restée depuis le milieu du XX^e siècle le fer de lance de la protection des cultures. La stratégie mondiale de développement de la production agricole a contribué depuis plus de 50 ans à une augmentation considérable du recours aux intrants et en particulier aux pesticides de synthèse pour atteindre aujourd'hui 2,5 millions de tonnes utilisées chaque année. Selon l'Union des industries de la Protection des Plantes (UIPP, 2013), la France est le premier consommateur européen de pesticides (62700 tonnes en 2011) et le quatrième mondial. Même si cette consommation est liée au niveau de production agricole, elle témoigne d'une utilisation massive de produits de synthèse avec 5kg consommés /ha.

Les effets non-intentionnels constatés ont largement remis en question le modèle simpliste imaginé auparavant : un problème, une solution chimique adaptée.

2.1. Constat actuel des effets non intentionnels

Au début des années 1960, l'audience du « Printemps silencieux » de Rachel Carson (Carson, 1962), révélait au monde l'importance des risques pour la santé publique et l'environnement encourus par l'usage des pesticides. Depuis, plusieurs études ont mis en évidence les effets négatifs des pesticides sur la santé humaine (Bell et al., 2006) même si les recherches relatives aux effets à long terme des expositions sont plus rares (INSERM, 2013).

La contamination de l'environnement est quant à elle bien avérée (Werf, 1996). La part des pesticides qui entre en contact avec les organismes indésirables cibles - ou qu'ils ingèrent - est minime. La plupart des chercheurs l'évaluent à moins de 0,3%, ce qui veut dire que 99,7% des substances déversées rejoignent l'environnement (Pimentel, 1995).

Les suivis réalisés par les autorités françaises mettent en évidence une dispersion importante et une présence généralisée des pesticides dans les milieux aquatiques (Ministère de l'Écologie, du Développement Durable et de l'Énergie, 2013). Le constat qui peut être dressé pour la France est applicable à la plupart sinon à la

totalité des pays européens. Il y a des signes clairs et significatifs d'une contamination des eaux de surface, souterraines et côtières au plan européen (Aubertot et al., 2005).

La contamination des sols par différentes substances, dont les pesticides, a été reconnue comme l'une des principales menaces qui pèsent sur les sols européens (CEC, 2002).

La présence de pesticides est également observée dans toutes les phases atmosphériques en concentrations variables dans le temps et dans l'espace (selon la proximité des sources) et cette contamination est chronique (Aubertot et al., 2005). L'impact des pesticides sur la dégradation de la biodiversité fait également l'objet de recherches mais de nombreuses interactions entre polluants et facteurs du milieu rentrent en jeu et compliquent cette évaluation (Stoate et al., 2001, Isenring, 2010).

De plus, avec le temps, l'usage accru des mêmes familles de produits a induit l'apparition de plus en plus rapide de résistances aux pesticides, obligeant à une course en avant dans l'utilisation et laissant parfois les agriculteurs dans une impasse technique.

Enfin, les performances économiques des stratégies de protection basées sur le tout chimique dépendent fortement des prix des produits agricoles dont les fluctuations se sont accentuées ces dernières années et plongent les agriculteurs dans de délicates incertitudes économiques.

La conjonction de ces préoccupations, essentiellement pour la santé publique et l'environnement, explique la vigueur prise par la contestation de l'usage des pesticides dans l'opinion publique et leur irruption dans les politiques publiques.

2.2. Une réglementation renforcée

Au niveau européen

- **La Directive Cadre Européenne sur l'Eau** (directive 2000/60/CE du 23 octobre 2000) établit un état de lieux par bassin versant hydrographique et dresse un programme d'action pour atteindre le bon état écologique et chimique des eaux d'ici 2005. Les Schémas Directeurs d'Aménagement et de Gestion des Eaux (SDAGE),

complétés par la Loi sur l'eau et les milieux aquatiques (n°2006-1772 du 31/12/06) permettent l'application française de la politique européenne.

- **Le Paquet Pesticides**, adopté en octobre 2009, vise à mettre en œuvre des stratégies de réduction des risques liés à l'utilisation des pesticides. Il est constitué d'un règlement concernant la mise sur le marché et l'évaluation des produits phytopharmaceutiques (Règlement CE n° 1107/2009) et d'une directive sur l'«utilisation durable» des pesticides (Directive 2009/128/CE) dont l'application au niveau national doit être faite a été mise en place à la fin 2011.

Au niveau français

Plusieurs plans d'action nationaux ont déjà été entrepris. Ils permettent d'une part de fixer des orientations, et des objectifs de réduction des risques liés aux pesticides, et d'autre part de promouvoir le développement d'alternatives à la lutte chimique. On dénombre ainsi :

- le Plan National Phytosanitaire du 1/08/2000 (Ministère de l'Agriculture et de l'Environnement), le Plan National Santé Environnement (2004-2008) (Ministères de la Santé, de l'écologie, du travail et de la recherche), le Plan Interministériel de Réduction des Risques liés aux Pesticides (2006-2009) (Ministères de la Santé, de l'agriculture, de l'écologie et de la concurrence, consommation et répression des fraudes). Globalement, tous visent à encadrer les conditions de mise sur le marché des produits phytosanitaires, à contrôler et minimiser leurs recours, à favoriser la formation et l'information des professionnels et des utilisateurs, et à améliorer les connaissances concernant leurs impacts sur l'environnement et la santé.

- **l'Arrêté Phytosanitaire du 12/09/06** décline en 17 articles, des dispositions appliquées à l'utilisation des pesticides telles que les délais de traitements ou les zones non traitées.

- **le Plan de Développement Rural Hexagonal** intègre également la question des pesticides. Il permet notamment la mise en place des Mesures Agro-environnementales Territoriales et Rotationnelles (respectivement MAET et MAER) qui sont des démarches d'engagement volontaires des agriculteurs.

- **Le Grenelle de l'Environnement** lancé en 2007 est l'illustration médiatique d'une prise de conscience collective. Il a permis l'émergence de propositions diverses, allant de la restauration de la biodiversité à la promotion de l'agriculture biologique. Des décisions politiques et réglementaires en découlent et s'inscrivent dans le **Plan Ecophyto 2018**. On retiendra notamment :

- la réduction de 50 % de l'usage des pesticides dans un délai inférieur à 10 ans, « sous réserve de la mise en œuvre par la recherche de solutions alternatives non chimiques »,

- la mise en place d'un réseau de 1000 fermes afin de favoriser l'innovation et d'assurer le transfert des bonnes pratiques agricoles économes en pesticides (MAAF, 2008).

Face à cette dynamique de réduction de l'utilisation des pesticides, et devant la nécessité de maintenir une agriculture compétitive, de nouveaux modes de protection des cultures doivent être envisagés.

3. Vers de nouveaux modes de protection des cultures

Le problème de la sécurité alimentaire s'inscrit aujourd'hui dans un contexte très particulier, celui de l'augmentation des échanges internationaux, du changement climatique, de la prise de conscience des risques environnementaux et des limites des ressources planétaires. Il convient donc de repenser les systèmes de culture et les modes de protection tout en maintenant une production élevée, en réduisant les coûts, en préservant la santé et l'environnement et en étant capable d'affronter des nouveaux bioagresseurs ou leur évolution.

La réduction des pesticides et l'amélioration de leur efficacité est une première étape. Des démarches volontaires ont vu le jour dans ce sens avec la promotion d'une agriculture dite raisonnée, qui vise, au-delà du respect de la réglementation, à renforcer les impacts positifs des pratiques agricoles sur l'environnement et à en réduire les effets négatifs, sans remettre en cause la rentabilité économique des exploitations. L'agriculteur va mieux « raisonner » ses traitements à partir de modèles de prévision des risques, d'observations des parcelles et d'outils d'aide à la décision définissant des seuils d'intervention. L'usage des produits phytosanitaires

n'intervient donc que lorsque cela est nécessaire et justifié et en minimisant si possible les quantités apportées (MAAF, 2002). Il s'agit en fait d'un aménagement raisonné des pratiques d'une agriculture de type industriel sans réelle rupture avec le modèle productiviste et sans remise en cause profonde du système de production.

Aujourd'hui les pouvoirs publics mettent l'agroécologie en avant pour accompagner l'agriculture dans sa transition vers la « triple performance » sociale, économique et environnementale. Elle se rapproche de « l'agriculture intégrée » qui anime la réflexion de chercheurs et d'agronomes depuis les années 1990 et en reprend les grands principes, soit la production d'aliments et de produits de haute qualité en utilisant des ressources et des processus naturels de contrôle ou de régulation pour remplacer des apports dommageables à l'environnement (OILB-SROP, 1973). Mais l'agroécologie se démarque de l'agriculture intégrée en insistant sur le besoin d'améliorer la compréhension des mécanismes de régulations biologiques à différentes échelles (Gliessmann, 2004). L'agroécologie constitue donc un continuum de l'agronomie et une promesse de nouveaux leviers pour améliorer les performances des exploitations dans un contexte climatique et économique plus incertain. Les principes de la Protection Intégrée des Cultures (PIC), maillon essentiel de la Production Intégrée, en combinant toutes les techniques existantes pour maintenir les bioagresseurs à des niveaux inférieurs à ceux causant des dommages d'importance économique, représentent un levier possible vers la réduction de l'utilisation des pesticides.

4. La Protection Intégrée des Cultures, un paradigme ancien, un nouveau champ d'actions

Recourir à des solutions alternatives à la lutte chimique sans l'exclure et rendre possible le « si possible » du plan Ecophyto, dans une démarche cohérente assurant efficacité et innocuité est l'objet de la protection intégrée. Ce concept mobilise les esprits depuis plus de 50 ans sans avoir obtenu le degré d'application espéré (Kogan, 1998, McRoberts et al., 2003).

4.1. Définition de la PIC

Le concept de lutte intégrée (ou IPC, Integrated Pest Control) prend sa source il y a plus de 50 ans, au sein de deux écoles : l'école californienne et l'école australienne. Dans le contexte du plein usage des pesticides, des entomologistes tentent d'opposer le principe d'éradication chimique au concept de régulation biologique permettant de limiter les populations au-dessous d'un seuil de nuisibilité. Ce concept repose alors sur l'association de la lutte chimique et d'un ensemble de méthodes biologiques, et s'applique essentiellement à la lutte contre les ravageurs. Dès lors, ce concept ne va cesser de s'étendre et va laisser la place au concept de Protection Intégrée des Cultures (PIC) qui connaît aujourd'hui un rayonnement international sous le nom de *Integrated Pest Management*, IPM (Ehler, 2006).

La définition de la PIC proposée par l'OILB en 1973 est la suivante. « La Protection Intégrée des Cultures est un système de lutte contre les organismes nuisibles qui utilise un ensemble de méthodes satisfaisant les exigences à la fois économiques, écologiques et toxicologiques, en réservant la priorité à la mise en œuvre délibérée des éléments naturels de limitation et en respectant les seuils de tolérance »(OILB-Srop, 1973).

Cette approche reprend les principes de la lutte intégrée définis par la FAO en 1968 (FAO, 1968) mais elle précise que la lutte chimique ne doit être utilisée qu'en dernier recours (Lucas, 2007).

L'intégration dont il est question ici est d'abord celle des méthodes de lutte mais aussi l'ensemble des pratiques qui ont un effet prophylactique sur les bioagresseurs. Elle amène à considérer la complexité des relations biotiques dans l'agro écosystème, y compris dans ses zones non cultivées et s'apparente à une gestion écologique de la santé des plantes (Ricci et al., 2011). Elle aboutit à revoir les systèmes de culture, voire l'ensemble du système de production ce qui conduit logiquement au concept de « production intégrée » (Vereijken, 1997).

4.2. Concepts clés et innovations pour la PIC

La mise en œuvre des principes de la PIC se raisonne en puisant dans un arsenal de méthodes pour combiner prévention, surveillance et lutte. La surveillance permet d'ajuster les interventions aux risques effectifs, la prévention a une place importante : elle inclut les mesures prophylactiques comme les pratiques culturales et le contrôle génétique. Pour la lutte, la voie chimique n'est pas exclue, mais la priorité est donnée aux autres méthodes : physique, biologique... (**Figure 3**). Il importe de mettre en cohérence ces différents leviers dans une démarche construite de protection intégrée. Néanmoins, aujourd'hui la lutte chimique reste le fer de lance de la gestion de la santé des végétaux. Pour réduire l'utilisation des pesticides, il apparaît donc incontournable au-delà de l'amélioration de l'efficacité de l'usage des produits, de proposer des méthodes de substitution dites alternatives aux pesticides. Cette étape représente le second niveau (niveau S) du processus d'innovation en protection des cultures proposée par Hill et MacRae, en 1995 (grille ESR, Efficacité, Substitution, Reconception, souvent utilisée pour l'analyse des transitions à différents niveaux de rupture avec l'agriculture conventionnelle (Lamine, 2011).

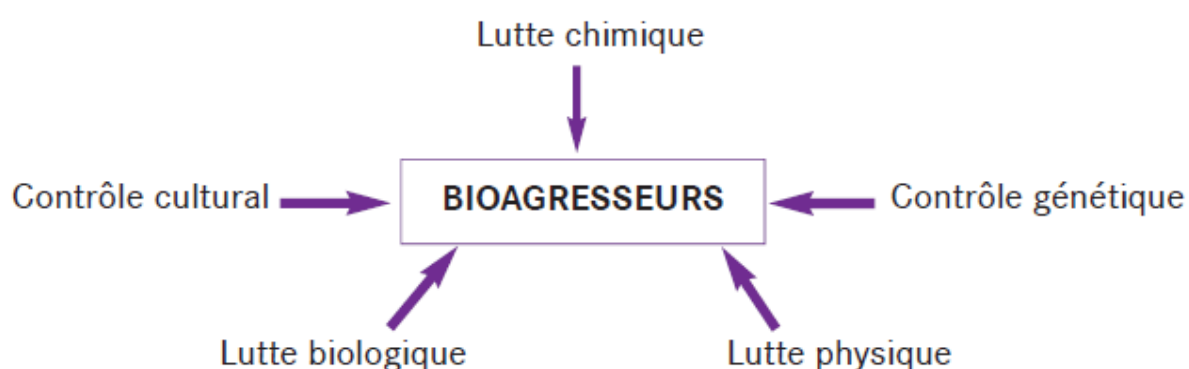


Figure 3 : Les différentes méthodes de contrôle ou de lutte contre les bioagresseurs (Aubertot, 2005)

Les méthodes de gestion alternative visent à mettre en œuvre un ensemble de moyens qui jouent sur différentes étapes du cycle des bioagresseurs et de la culture et concourent ainsi à limiter l'incidence des bioagresseurs, leur développement et la contamination de la culture. On entend ici par « méthode alternative » toute méthode

autre que la lutte chimique (Aubertot et al. 2011). Ces méthodes s'appuient sur des pratiques agissant à différentes étapes du cycle du bioagresseur et/ou de la culture. En amont, des méthodes peuvent être mobilisées pour agir sur le stock initial de bioagresseurs et limiter le développement des populations qui sont sources de contamination des cultures. Au cours du cycle de développement de la culture, les méthodes utilisables peuvent reposer sur des stratégies d'évitement. Elles consistent à éviter la concordance entre la phase de contamination du bioagresseur et la période de sensibilité de la culture. On peut également faire appel à des stratégies d'atténuation en culture, qui ont pour objectif de minimiser les dégâts lorsque la culture et le bioagresseur se trouvent en contact. Enfin, les solutions de rattrapage permettent de limiter les dégâts lorsque les leviers mis en œuvre auparavant n'ont pas été efficaces. Le **Tableau 1** reprend le classement proposé par Aubertot et al. En 2011. La **Figure 4** présente le positionnement de ces différents leviers de gestion en grandes cultures.

L'éventail potentiel des méthodes est large mais il n'existe pas nécessairement de solutions adaptées à tous les usages couverts par les pesticides et elles n'assurent pas toujours un niveau aussi élevé de maîtrise, surtout quand la pression biotique est forte. C'est néanmoins le point de départ d'une dynamique de changement.

Type de stratégie	Méthodes correspondantes
Action sur le stock initial d'inoculum	rotation, travail du sol, lutte biologique
Stratégie d'évitement	Date de semis
Stratégie d'atténuation en culture	Variétés, association d'espèces et de variétés, date et densité de semis, fertilisation, gestion de l'irrigation
Solutions de rattrapage	Désherbage mécanique, lutte chimique

Tableau 1 : Stratégies de gestion des bioagresseurs selon Aubertot et al. (2011)

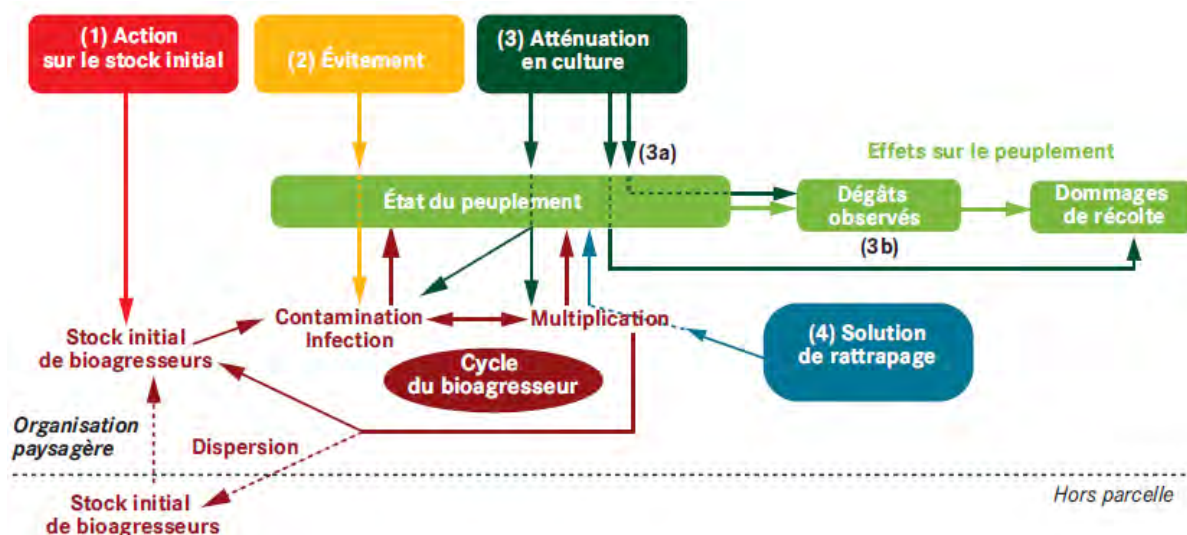


Figure 4 : leviers de gestion des bioagresseurs (Aubertot et al. 2011)

L'éventail potentiel des méthodes est large mais il n'existe pas nécessairement de solutions adaptées à tous les usages couverts par les pesticides et elles n'assurent pas toujours un niveau aussi élevé de maîtrise, surtout quand la pression biotique est forte. C'est néanmoins le point de départ d'une dynamique de changement. Au-delà de ces méthodes de substitution, la réduction de la dépendance aux pesticides appelle à une reconception du système de production (niveau R). Il s'agit ici de passer du modèle de production conventionnel basé sur des variétés productives et des niveaux élevés d'intrants, à un système moins vulnérable, plus durable et moins dépendant des intrants.

Mettre en œuvre les principes évoqués précédemment nécessite de reconsidérer les échelles spatio-temporelles et de changer de logique. Contrairement à la lutte chimique centrée sur l'itinéraire technique¹, la PIC se raisonne à plus long terme sur le système de culture². La stratégie de réduction de l'utilisation des pesticides doit donc se projeter sur une échelle pluriannuelle : la diversification des types de culture

¹ L'itinéraire technique est défini comme "une combinaison logique et ordonnée des techniques mises en œuvre sur une parcelle agricole en vue d'en obtenir une production" (Sebillotte, 1990). Ce concept met donc l'accent sur la cohérence et les interactions entre toutes les interventions techniques ; il disqualifie de fait les modifications techniques ponctuelles, envisagées sans évaluation de leurs impacts éventuels sur les états du milieu et du peuplement végétal.

² Système de culture : Le système de culture est défini comme "l'ensemble des modalités techniques mises en œuvre sur des parcelles traitées de manière identique. Chaque système de culture se définit par : (i) la nature des cultures et leur ordre de succession, (ii) les itinéraires techniques appliqués à ces différentes cultures" (Sebillotte, 1990).

et des cycles culturels, l'alternance de travail du sol par exemple permettant de diversifier les périodes de levée des adventices et de limiter leurs stocks semenciers. Réduire les pesticides, c'est aussi les préserver en alternant les familles chimiques d'herbicides dans le système de culture.

De même d'un point de vue spatial, la PIC dépasse le niveau de la parcelle pour embrasser un territoire bien plus large et pertinent pour la gestion des problèmes locaux allant d'îlots de parcelles, à l'aire de production. La PIC a ainsi évolué en intégrant le concept de protection spatio-temporelle des cultures ou Area-Wide Pest management, IPM-AWP (Hendrichs et al., 2007). Elle privilégie ainsi simultanément des échelles de temps et d'espace inconnues de l'agriculture intensive et se rapproche des principes revendiqués par l'agroécologie.

Le **Tableau 2** montre comment la protection intégrée, doit se décliner à ces différents pas de temps et échelles spatiales (Lucas et Meynard, 2000).

	Parcelle (1-10ha)	Îlot de parcelles (100-1000ha)	Région (10⁴-10⁶ ha)
<i>Ajustement tactique</i>	Ajuster les traitements en fonction de la nuisibilité prévue de l'ennemi des cultures et des effets non intentionnels	Choisir les « parcelles guides » que l'on surveillera pour révéler les risques parasitaires	Prévoir les risques parasitaires en fonction du climat de l'année
<i>Stratégie de campagne (Itinéraires techniques)</i>	Par des itinéraires techniques appropriés, réduire le développement des populations de bioagresseurs, leur nuisibilité, et maximiser l'efficacité des méthodes de lutte non chimiques Gérer le climat des abris en fonction des risques parasitaires	Maitriser les contaminations de proximité Diversifier les sources de résistance génétique Créer des zones refuges pour auxiliaires	Diversifier les sources de résistance génétique
<i>Stratégie à long terme (Systèmes de culture)</i>	Par des systèmes de culture appropriés, réduire l'inoculum ou les stocks de semence dans la parcelle	Entretien des zones refuges pour auxiliaires Maitriser les contaminations de proximité par des bioagresseurs à épidémies polyétiques	Préserver, par la mise en œuvre coordonnée de moyens de lutte variés, la durabilité des résistances variétales et l'efficacité des matières actives disponibles

Tableau 2 : Raisonnement des méthodes de protection intégrée (d'après Lucas et Meynard, 2000)

4.3. L'adoption de la PIC : perspectives et limites

La Protection Intégrée des Cultures devient un standard européen. En effet, l'Europe s'est dotée d'une législation plus contraignante avec le « paquet pesticide » qui instaure un cadre communautaire pour parvenir à une utilisation des pesticides compatible avec le développement durable (Union Européenne, 2009). Nombre des dispositions sont déjà incluses dans le plan Ecophyto 2018 pour constituer le plan d'action français. La directive exige en outre dans son article 14 que l'ensemble des pays membres ait adopté d'ici 2014 les principes de la PIC.

La transition vers la PIC engendre des conséquences à de nombreux niveaux et il est illusoire d'attendre d'une seule méthode « miracle » une solution rapide et aisée à la sortie du « tout chimique ». La question de la protection des cultures doit alors être envisagée dans sa complexité : complexité des relations entre bioagresseurs, leurs hôtes, le milieu, le contexte socio-économique. La conception des systèmes en PIC prend en compte cette complexité en appréhendant toutes ces interactions.

La grille ESR permet de mieux comprendre les perspectives qui peuvent contribuer à une transition vers la PIC. Au niveau E, des progrès considérables peuvent être obtenus en généralisant les outils de diagnostic des risques, en développant la pulvérisation de précision. Pour le niveau S, si des moyens alternatifs existent pour un grand nombre de bioagresseurs, chacun n'a généralement qu'une efficacité limitée, ce qui restreint les possibilités de substitution. La réduction significative de l'usage des pesticides nécessite donc de combiner les méthodes entre elles, en recherchant des complémentarités, voire des synergies, dans le cadre de reconception de systèmes innovants en réelle rupture (niveau R). Par exemple, il est nécessaire de bâtir des systèmes de culture en raisonnant conjointement conduites et variétés (Loyce et al., 2012). Cela suppose aussi une rénovation des pratiques de recherche et développement.

Néanmoins, à ce jour, la mise en œuvre de la PIC en grandes cultures est confrontée à des difficultés ou verrouillages³ économiques, techniques et agronomiques qui freinent son développement.

Il convient néanmoins de rester réaliste et de reconnaître lucidement les contraintes et les verrouillages d'ordre technique mais aussi socio-économiques ou organisationnelles qui persistent aujourd'hui et limitent l'adoption plus généralisée de la PIC (Jeger, 2000, Wilson et Tisdell, 2001).

Le changement de paradigme visant à passer de la protection chimique à une gestion écologique de la santé des plantes nécessite non seulement de concevoir des innovations adéquates mais surtout de débloquent des verrous qui se situent à différents niveaux du système.

³ La notion de « verrouillage », elle, fait référence à un ensemble de mécanismes par lesquels le développement et la diffusion des alternatives de production et les innovations radicales d'organisation, sont inhibées et exclues. (G. Vanloqueren, P. Baret, 2009, "How agricultural research systems shape a technological regime that develops genetic engineering but locks out agroecological innovations", *Research policy*, pp. 971-983.)³

Chapitre 2. Une approche systémique nécessaire en protection des cultures

1. Aperçu des recherches sur les approches systémiques en PIC

Nous avons vu dans le chapitre 1 que les bioagresseurs peuvent entraîner sur les cultures visitées des combinaisons de dégâts ou profil de dégâts qui peuvent entraîner des dommages (Savary et al., 2000b). Ces relations ne sont pas linéaires et dépendent de la situation de production comme de nombreux auteurs l'ont démontré (Savary et al., 2000b, Zadoks, 1984, Daamen et al., 1989, Breman et de Wit, 1983).

Dans ce travail, une situation de production peut être définie comme l'ensemble des caractéristiques physiques, chimiques et biologiques d'un champ cultivé (en dehors du peuplement cultivé) et de son environnement, ainsi que par les déterminants socio-économiques et techniques susceptibles d'influencer les décisions de l'agriculteur. Dans cette définition, l'environnement de la parcelle fait référence au climat et aux éléments du territoire susceptibles d'interagir avec la parcelle considérée (autres parcelles, bordure, forêts, ...) via des flux biotiques ou abiotiques (Aubertot et Robin, 2013)

Dans une situation de production donnée, un agriculteur peut mettre en place plusieurs systèmes de culture selon ses connaissances, son organisation, ses objectifs, ses contraintes, le contexte socio-économique ... Néanmoins, un système de culture choisi dans une situation de production précise entraînera un profil de dégâts unique et un potentiel de dommages (Aubertot et Robin, 2013). On peut alors découper la relation en plusieurs composantes :

- relation situation de production-système de culture-profil de dégâts
- relation profil de dégâts-dommages (dépendante de la situation de production)

Enfin, certaines études s'intéressent directement à la relation situation de production-dommages.

1.1. Etudes décrivant la relation situation de production-dégâts

Il est important de noter au préalable que la définition de « situation de production » revêt de nombreuses acceptions dans la littérature et que son caractère polysémique traduit la complexité du système décrit. Pour certains auteurs, la situation de production se rapproche plus de régions géographiques bien caractérisées par le climat et les cultures présentes, d'autres y incluent le sol ou encore des pratiques de production. Nous reprendrons donc ici ce terme avec le sens sous-jacent que les auteurs lui ont donné, tout en précisant que dans la suite de ce manuscrit, ce sera notre définition qui prévaudra.

Zadoks (Zadoks, 1984) a montré le premier que les situations de production et les profils de dégâts étaient liés. Ce lien a ensuite été vérifié dans plusieurs systèmes de production. Savary (Savary, 1987) s'est intéressé aux complexes de maladies fongiques touchant les légumineuses annuelles cultivées dans différentes régions agro écologiques de Côte d'Ivoire (arachide, vigna, voandzou, soja et dolique).

Daamen et al. (Daamen et al., 1989) ont étudié les dynamiques des bioagresseurs du blé dans des systèmes à plus ou moins fort niveau d'intrants aux Pays Bas. Les enquêtes réalisées et les résultats ont permis de fournir des jeux de données utilisées comme variables d'entrée du modèle Wheatpest que nous présenterons plus tard (Willoquet et al., 2008). Avelino et al. (Avelino et al., 2006) ont mis en évidence la dépendance entre situations de production dans la culture de café et le développement épidémique de la rouille (dans une approche monospécifique seulement).

Une étude menée sur les bioagresseurs du riz en Asie, met en évidence que les pratiques culturelles et les profils de dégâts sont fortement associés à l'échelle régionale (Savary et al., 2000b).

Le plus souvent les liens entre situation de production et profils de dégâts sont établis grâce à des analyses statistiques multivariées (Savary et al., 1995; Sanogo et Yang, 2004).

Ces différentes études ouvrent donc une voie dans l'appréciation de la relation situation de production-dégâts mais elles se restreignent à un seul bioagresseur ou à une prise en compte partielle des facteurs influants. Elles ne comprennent donc pas

l'ensemble des caractéristiques de la parcelle et de son environnement tels que nous l'entendons et nous avons donc opté pour une approche innovante d'analyse et de modélisation des relations entre les pratiques culturales et l'environnement biotique et abiotique d'une parcelle cultivée.

1.2. Études décrivant la relation dégâts-dommages

Les dommages évalués sont le plus souvent les pertes de rendement bien que ce ne soit pas les seuls dommages existants. Dans ce cas, l'appréciation des pertes de rendement se fait par comparaison entre une situation observée et une situation idéale sans bioagression. Cette appréciation peut se faire par rapport au rendement potentiel théorique mais se fait le plus souvent par rapport au rendement accessible ou rendement réel maximum (**Figure 5**).

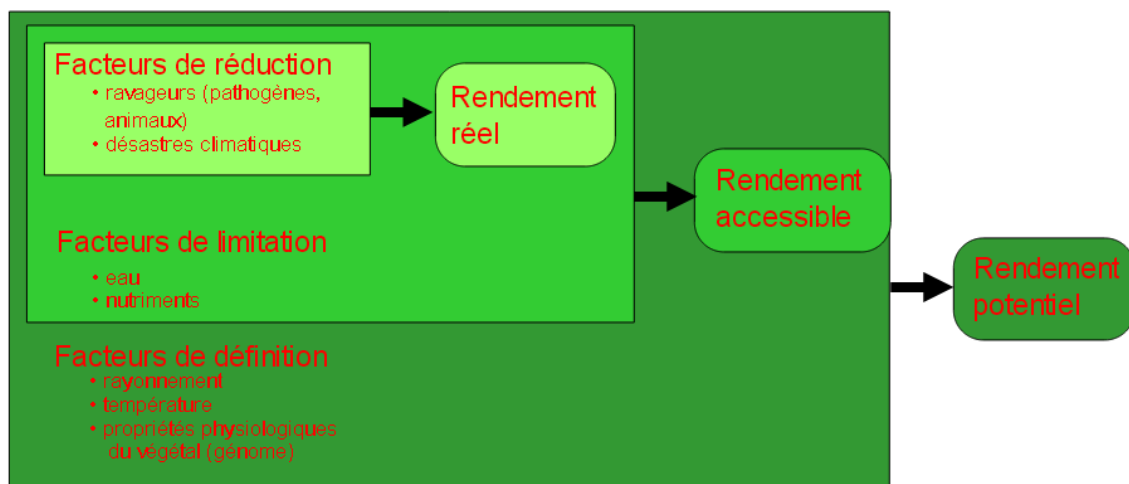


Figure 5 : concept de performances potentielles, accessibles, réelles et facteurs déterminants d'un rendement (d'après Rabbinge, 1989)

Dans l'étude de Savary et al. (Savary et al., 2000b) précédemment évoquée, la mesure des rendements réels, a permis d'établir un lien entre dégâts et dommages : Les pratiques culturales et les profils de dégâts sont étroitement liés à l'échelle locale et peuvent prédire une description fiable de la variation des rendements. La quantification des dommages (Savary et al., 2000a) est approchée grâce à l'expérimentation. Les fonctions de dégâts-dommage établies permettent de hiérarchiser l'importance des profils de dégâts en fonction de leurs impacts. D'un

point de vue applicatif, ces fonctions permettent ensuite de prédire les pertes de rendements selon différents scénarios grâce à leur intégration dans un modèle : Ricepest (Willcoquet et al., 2002). Ceci permet de définir des priorités concernant la gestion des bioagresseurs du riz et de développer de nouvelles stratégies de lutte en fonction des situations de productions. La même méthode a été appliquée au blé pour la construction de Wheatpest (Willcoquet et al., 2008).

Concernant la culture de blé d'hiver, Zhang et al. (Zhang et al., 2006) se sont intéressés à la relation entre la sensibilité de différents cultivars à quatre maladies foliaires (rouille brune, rouille jaune, septoriose et oïdium), les profils de dégâts rencontrés, et les pertes de rendements occasionnées. Cette étude donne une image des profils de maladies rencontrés assez représentative de la situation française car elle prend en compte un assez large éventail de sensibilités de cultivars et de conditions environnementales. Cependant, dans cette étude, l'influence des situations de productions sur les maladies et sur les variations de rendements n'est pas prise en compte.

1.3. Conclusion partielle sur l'état des lieux de cette recherche

La PIC repose dans une large mesure sur les effets cumulés de techniques à effets partiels et contre des bioagresseurs multiples ayant entre eux et avec leur environnement des relations complexes. Mais, la prise en compte de l'impact sur les bioagresseurs de la combinaison des différentes pratiques culturales et de leurs interactions au sein d'un itinéraire technique ou d'un système de culture est difficile non seulement à cause de la multiplicité des bioagresseurs à considérer, mais également à cause de la multiplicité des interactions à considérer entre système de culture, communautés de bioagresseurs, milieu et peuplement.

La PIC doit donc envisager 2 intégrations : une dimension horizontale (gestion simultanée de plusieurs populations de bioagresseurs) et verticale (combinaison de méthodes à effets partiels). Ces 2 approches de la protection intégrée ne sont que trop peu étudiées par la recherche agronomique. Du fait de la spécialisation disciplinaire, les travaux systémiques pour la protection/production intégrée sont trop rares. De plus, le peu d'études réalisées sur les effets des méthodes de contrôle ne

concerne, en général, qu'un seul bioagresseur majeur (approche mono-spécifique). Ceci n'est pas complètement satisfaisant car les agriculteurs doivent gérer des profils de dégâts (approches plurispécifiques). Or, la mise en œuvre de tout acte technique peut affecter l'ensemble de la biocénose et donc l'ensemble du profil de dégâts de la culture (Zadoks, 1993).

Il est donc extrêmement difficile de décrire l'ensemble du système 'pratiques culturales/peuplement/communauté de bioagresseurs/environnement'. La complexité de ce système et la nécessité d'adapter les réponses au niveau local justifie la mobilisation d'outils aide à la décision stratégique prenant la forme de modèles. Il existe peu de travaux de modélisation prenant en compte plusieurs bioagresseurs et rares sont ceux où les effets des pratiques de contrôle sur le développement des ennemis des cultures sont pris en compte.

Notamment, les modèles épidémiologiques développés pour les maladies du blé ne prennent en compte au mieux qu'un seul élément de l'itinéraire technique et le plus souvent aucun (Aubertot, 2005b).

2. Etat de l'art de la modélisation en PIC, le cas de la culture du blé d'hiver

Pour réduire la complexité des mécanismes impliqués ici dans la gestion des agroécosystèmes, analyser, comprendre et disséquer le jeu des multiples interactions, synthétiser et résumer un ensemble de connaissances disponibles, intégrer des disciplines jusque-là disjointes, prédire et simuler des phénomènes, concevoir et évaluer de nouveaux systèmes, mais aussi transmettre et partager, la modélisation est l'outil le mieux adapté.

Dans le domaine de la protection du blé, on rencontre donc :

- **des modèles de culture du blé** : De nombreux modèles de culture ont été développés sur la culture du blé (Asseng et al., 2013). Les variables d'entrées sont en général relatives au climat, au sol et au système de culture et les variables de sortie relatives à la production (quantité et qualité), e.g CropSyst (Bergez et al., 2010, Stockle et al., 1994, Brisson et al., 1998, Jamieson et al., 1998). Ils ne

s'intéressent que très rarement aux interactions avec les bioagresseurs et n'intègrent pas de module épidémiologique (Bergez et al., 2010).

- des modèles épidémiologiques :

Les modèles mécanistes épidémiologiques formalisent la connaissance sur le pathogène en relation avec son hôte. Dans ce type de modèle, les mécanismes de développement du pathogène sont décrits avec précision (conservation, infection, cycle de développement, etc.). L'approche climatique est privilégiée. Par exemple, l'infection aura lieu si les conditions d'humidité relative et de températures requises sont présentes.

Généralement une seule maladie est prise en compte par exemple la septoriose (Gouache et Couleaud, 2009), la rouille brune (Benizri et Projetti, 1992) ou le piétin verse (Rapilly et Jolivet, 1976, Benizri et Projetti, 1992, Payen et al., 1983).

- des modèles de nuisibilité :

En fonction d'un niveau de symptômes de maladies, de ravageurs, ou d'adventices, les pertes de rendement sont simulées, par exemple :

- EIPRE (Zadoks, 1988), un des premiers modèles promouvant la PIC dans un contexte de production très intensive, et dont l'objectif vise à simuler plusieurs bioagresseurs du blé en intégrant le contrôle chimique, le choix variétal, et des données économiques de l'agriculteur pour prédire le développement du bioagresseur, alerter sur les pertes de rendement possibles et proposer un conseil limitant le coût et l'usage des pesticides,

- WHEATPEST (Willoquet et al., 2008), dont l'objectif vise à évaluer les effets combinés de bioagresseurs sur les performances en termes de rendement du blé en Europe et contribuer ainsi à une meilleure gestion des stratégies de contrôle.

- Plus rarement, le système de culture est pris en compte e.g. DECIBLE (Chevalier-Gerard et al., 1994). Néanmoins, dans ce modèle, les auteurs ne cherchent pas à prédire une perte de rendement pour une future année climatique, mais à utiliser des essais d'années climatiques passées pour fournir une fréquence d'obtention de telle ou telle valeur de rendement pour une parcelle donnée.

- des modèles d'aide à la décision :

Ces modèles sont des outils d'aide à la décision tactique ou stratégique. Ils se basent sur des données climatiques, des simulations épidémiologiques, et des seuils d'intervention. Le plus fréquemment, ils permettent de raisonner des traitements fongicides au jour le jour selon des seuils d'intervention prédéterminés (décision tactique). Les potentialités de contamination, les prévisions de sévérité (basées sur les données climatiques) ou les estimations de pertes de rendements sont confrontées aux seuils de décision de traitements fongicides. Par exemple, si plus de 35 % des tiges sont infectées par le piétin verse, alors le conseil est de traiter (ARVALIS, 2013a). Le concept de seuil de nuisibilité économique est au cœur de nombreux modèles bioéconomiques d'aide à la décision (surtout aux USA) bien que ce concept se soit moins facilement imposé pour les adventices ou les maladies que pour les insectes et que l'usage des modèles pose toujours de nombreux problèmes pratiques de mise en œuvre (Wilkerson et al., 2002).

Très peu de modèles permettent de raisonner la place des traitements fongicides par rapport à d'autres techniques de protection (décision stratégique) (ex : modèle DECIBLE (Chatelin et al., 2005)).

La plupart du temps, une seule maladie est prise en compte (ex: SPIROUIL (Rocque, 1991), TOP (Delos, 1995), PRESEPT (Rouzet et Murer, 1995).

Parfois, le modèle général est une agrégation de plusieurs modèles (un pour chaque maladie), c'est le cas de EIPRE (Zadoks, 1988).

- des modèles décrivant les relations entre système de culture et profils de bioagresseurs du blé :

Très peu de modèles prennent en compte ces relations. N. Colbach (Colbach et al., 1999, Colbach et Huet, 1995) a développé ce type de modélisation sur le piétin-verse et les maladies du pied. Pour les adventices, les développements en terme de modélisation systémique sont plus avancés : ALOMYSYS (Colbach et Chauvel, 2005) et FLORSYS (Gardarin et al., 2007) permettent de représenter les effets du pédoclimat, de différents éléments du système de culture et de l'application d'herbicides respectivement sur les populations de vulpin et les communautés d'adventices. Par ce fait, cette méthode de modélisation, propose une dimension

horizontale de la PIC grâce à une approche plurispécifique et une dimension verticale avec la prise en compte de plusieurs méthodes de contrôle.

D'autres outils comme les grilles de décision de traitements fongicides intègrent parfois les pratiques culturales (ex : Grille agronomique blé tendre d'évaluation du risque d'accumulation du déoxynivalénol (DON), Arvalis 2012).

Ainsi, à partir du climat et de quelques éléments cultureaux, une note de risque maladie est calculé et des recommandations agronomiques ou des conseils de traitement sont apportés.

Le Baromètre Maladies d'Arvalis permet également de calculer un risque associé aux principales maladies du blé tendre dans une région donnée. Basé sur des informations agronomiques et climatologiques, le baromètre calcule instantanément un niveau de risque sur 7 jours, centré sur le jour de la simulation, pour 5 maladies. Calculés grâce à des modèles agro-climatiques, les risques indiquent le développement probable de chaque maladie et sont affichés en trois catégories de risque (Arvalis, 2013b).

En définitive, Il existe peu de travaux de modélisation prenant en compte plusieurs bioagresseurs du blé et rares sont ceux où les effets des méthodes de contrôle autre que chimique sur le développement des ennemis des cultures sont considérés.

Il apparait donc prioritaire de pouvoir appréhender et modéliser la diversité et la complexité du profil de bioagresseurs au sein d'un agroécosystème afin de concevoir des stratégies de gestion intégrée.

Chapitre 3. Le blé, une culture à enjeux pour l'agriculture de demain

Compte tenu de son importance dans l'agriculture française, dans l'alimentation et la sécurité alimentaire mondiale et des éléments de connaissance disponibles tant du point de vue de son écophysiologie que de ses bioagresseurs, c'est la culture du blé qui a été retenue comme support de notre travail. Forte consommatrice de pesticides (en termes de surfaces déployées), le blé se doit donc d'être un objet de réflexion prioritaire pour la protection intégrée.

1. Une denrée alimentaire de base au cœur des enjeux mondiaux

1.1. Production mondiale

Le blé, céréale la plus cultivée au monde, n'a cessé de voir sa production augmenter depuis les années 60, passant de 222 millions de tonnes en 1961 à 710 millions de tonnes en 2013 (Agreste, 2013a). Ce phénomène est généralisé à la production céréalière qui représente 2,5 milliards de tonnes en 2010 et dont le blé représente 30% (FAO, 2012).

Près de 700 millions de tonnes produites ont été utilisées ce qui fragilise les stocks mondiaux autour de 170 millions de tonnes. En toute logique, les besoins en blé augmentent régulièrement. En effet, une proportion croissante de blé est utilisée pour l'alimentation animale dans les pays industrialisés (45% de son usage total dans l'UE). L'utilisation de blé par habitant dans les pays en développement, essentiellement pour l'alimentation humaine, a continué d'augmenter, et la plupart de ces pays sont de plus en plus dépendants des importations (FAO, 2012). Le maintien à un niveau supérieur à celui du blé du prix du maïs, l'accroissement démographique, l'élévation du niveau de revenus et l'évolution des régimes alimentaires des pays émergents vers une alimentation plus riche en produits carnés vont entraîner une augmentation de la consommation humaine de blé d'ici 2030. Selon l'Organisation des Nations unies pour l'alimentation et l'agriculture (FAO, 2009), la population mondiale (d'environ 6 milliards d'habitants) atteindra les 8

milliards d'habitants en 2030. Bien que la croissance démographique soit estimée à la baisse par rapport aux trente dernières années (1,1% par an jusqu'à 2030, contre 1,7% par an les 30 dernières années) ceci représenterait néanmoins un besoin supplémentaire en céréales d'un milliard de tonnes.

Le blé est aussi la culture prédominante sur le plan du commerce international (137 millions de tonnes échangées en 2013). Malgré des tonnages échangés relativement constants depuis une dizaine d'années, on assiste à une forte volatilité des prix (**Annexe 1**).

1.2. Production européenne et française

L'Union européenne à 27, en tant qu'espace économique, occupe le premier rang mondial devant la Chine pour la production de blé (blé tendre et blé dur confondus). En 2012, la surface cultivée en blé tendre est de 22,8 millions d'hectares et de 2,8 millions d'hectares en blé dur, ce qui représente respectivement 40% et 5% de la sole en céréales. Depuis 2003 (Europe à 25), la sole de blé a augmenté d'environ 24%, tandis que les récoltes ont augmenté d'environ 50%, ce qui témoigne d'une amélioration des rendements. La moyenne des rendements de l'Union Européenne (depuis 2003) est de 56.5 q ha⁻¹ pour le blé tendre et de 28.7 q ha⁻¹ pour le blé dur. Ces moyennes lissent de forts écarts de productivité entre pays membres. En blé tendre, les principaux pays producteurs (en tonnage) sont la France, l'Allemagne, le Royaume Unis, la Pologne, la Roumanie, le Danemark, la République Tchèque, la Hongrie et l'Espagne. En blé dur, l'Italie, la France, l'Espagne et la Grèce assurent 98% de la production européenne (AGPB, 2013).

En 2012, **la France** a réalisé 24% des récoltes de céréales de l'U.E, ses surfaces de céréales représentant 16.4 % de celles des 27 pays membres. La filière céréalière occupe la moitié des terres arables françaises, la sole de blé en atteignant 70%. En 2013, 5 millions d'hectares de blé tendre et 0.4 million d'hectares de blé dur étaient cultivés.

La surface cultivée de blé tendre française est restée relativement stable depuis les quinze dernières années. A l'inverse, la surface en blé dur a presque doublé avant de se replier de 10% en 2013 (Agreste, 2013b).

La production de blé tendre pour 2013-14 devrait s'établir autour de 36 millions de tonnes. Il s'agit de la collecte la plus importante depuis 2009 (Agreste, 2013a).

Depuis 1980, la production française de blé tendre a progressé de plus de la moitié, grâce surtout à la hausse des rendements constatée jusqu'à la fin des années 1990, en lien notamment avec le progrès génétique. Au début des années 1980, le rendement du blé tendre atteignait seulement 51 q ha⁻¹. Au cours des années 1990, il s'est amélioré en tendance de 0.9 q ha⁻¹ par an. De 65 q ha⁻¹ en 1989, il est passé à 73 q ha⁻¹ en l'an 2000. Sur la période récente, les rendements se sont stabilisés (Agreste, 2013a). En 2013, ils atteindraient 72.1 q ha⁻¹ en moyenne, soit un recul de 1 q ha⁻¹ par rapport à la moyenne sur cinq ans. (AGPB, 2013)

Avec 1.8 Mt, et un rendement moyen de 54 q ha⁻¹, la récolte de blé dur chuterait de plus d'un quart en 201x, conséquence du fort repli des surfaces à 400 000 hectares (Franceagrimer, 2013).

Un tiers du blé tendre produit est utilisé en meunerie en France (farine) ventilé selon la répartition suivante : biscuiterie 10 % ; boulangerie-pâtisserie 81 % ; autres utilisations 9 %. Les deux autres tiers sont utilisés pour l'alimentation des animaux, la production de semences, l'usage industriel, l'amidonnerie, le bioéthanol ou sont exportés.

Le blé dur entre dans la fabrication des pâtes, de la semoule représente un peu plus de 3 % de la production de blé française. Cette catégorie de blé est davantage cultivée dans les régions du sud à climat chaud et sec.

2. Rappel sur l'écophysiologie du blé

Le blé *Triticum spp* est une céréale à paille annuelle, de la famille des Poacées, haute de 0.5 à 1.5m, à inflorescence en épi terminal, et cultivée pour ses grains (ou caryopses). On distingue le Blé tendre *Triticum aestivum* L. et le Blé dur *Triticum durum* L. (INRA, 1998).

Les étapes successives de croissance et de développement du blé sont les suivantes : germination, levée, tallage, montaison, redressement, gonflement, épiaison, fécondation, floraison, grossissement et maturation du grain (Gate, 1995). Il existe plusieurs échelles permettant de qualifier les différents stades de

développement physiologique du blé, la plus commune étant l'échelle BBCH (Lancashire et al., 1991)

La culture du blé s'étale sur une période de temps assez longue du semis à l'automne à la récolte en été, ce qui permet à un grand nombre de bioagresseurs de pouvoir commettre des dégâts.

Il s'agit principalement de cultures d'hiver, avec semis à l'automne et récolte en cours d'été qui occupent généralement le sol pendant toute la phase hivernale. Les semis sont plus précoces dans les régions du nord de la France et dans les zones d'altitude, à partir de septembre et plus tardif dans le sud de la France de mi-octobre à début décembre. Si les bioagresseurs du blé dur sont les mêmes que ceux du blé tendre des sensibilités ou adaptations des souches peuvent exister.

3. Une culture soumise à un cortège de bioagresseurs

Le blé est soumis à un large éventail de maladies (une centaine), d'adventices (une centaine) et de ravageurs (une trentaine)(Wiese, 1987).

Etant donné l'abondance des bioagresseurs, il convient de les hiérarchiser selon leur importance.

L'importance d'un bioagresseur dépend de plusieurs variables :

-sa présence (répartition sur le territoire et fréquence d'occurrence sur une période donnée)

-sa nuisibilité (dommages occasionnés)

Ces deux notions sont difficiles à décrire sans un suivi territorial précis et de longue durée, ainsi qu'un travail de synthèse de ces résultats (données difficilement accessibles).

Concernant la présence d'un bioagresseur, l'effet du climat de l'année sera tout d'abord déterminant. De plus, la variabilité interrégionale étant très forte, un organisme préoccupant dans le nord de la France ne le sera pas forcément au sud, il est donc difficile de généraliser au niveau national. Les pratiques culturales auront également une influence sur la pression parasitaire, comme par exemple le précédent cultural pour les bioagresseurs à forte héritabilité parcellaire. De plus, la

présence d'un bioagresseur ne nous renseigne pas forcément sur les dégâts et les dommages potentiels. Ceux-ci dépendent du sol, du climat (sur lequel aucune intervention n'est possible), des pratiques culturales et de la situation de production.

Un travail d'inventaire et de caractérisation des bioagresseurs des cultures est en cours d'élaboration/validation dans le cadre de la production d'un "Mémento d'assistance technique pour la mise en œuvre de bonnes pratiques agronomiques, volet sante des végétaux" (Délos, 2008). Il permet de dresser une liste des "principaux" bioagresseurs de chaque culture et les facteurs déterminant la sensibilité de la culture. Sont retenus comme bioagresseurs "principaux" ceux qui, compte tenu de leurs caractéristiques en termes de probabilité d'occurrence, de magnitude de risque (perte occasionnée), ainsi que leur tendance d'évolution en fréquence sur le moyen terme présentent un risque élevé (Délos, 2011).

Le tableau en **Annexe 2** (Cholez, 2011) présente une synthèse de données ayant servi à ce travail.

L'INRA en 2009 dans l'étude Écophyto R&D « Quelles voies pour réduire l'usage des pesticides » a recensé sur le blé principalement 5 maladies (septoriose, rouille brune et rouille jaune, piétin-verse et fusariose) qui sont traitées (le piétin échaudage n'a pas de méthode de lutte chimique en culture), trois ravageurs (le puceron vecteur de la JNO, les cicadelles vectrices du nanisme du blé et le puceron de printemps) et des virus transmis par *Polymyxa graminis* (mosaïques). D'autres ravageurs potentiellement importants, dont les mouches au semis, la mouche grise, la mouche jaune, ne sont pas traités, les dégâts étant plus ponctuels et gérés par le traitement appliqué sur la semence sauf pour la mouche jaune (Délos, 2008). L'ergot, mentionné dans le tableau de l'**Annexe 2**, est un cas un peu particulier : c'est une maladie marginale en France, mais qui affecte la sécurité sanitaire de l'aliment et peut donc avoir des conséquences graves en matière de santé publique (INRA, 2009). Les maladies transmises par la semence (carie, charbons) ne sont pas abordées, considérant qu'il s'agit de problèmes gérés par les traitements appliqués sur la semence.

La lutte chimique actuelle ne permet pas de contrôler de manière efficace l'ensemble de ces bioagresseurs. Si l'oïdium, rouilles et septoriose sont gérés efficacement, le contrôle chimique n'est que partiel sur piétin-verse et fusarioses (60% d'efficacité maximum).

Une présentation bibliographique détaillée de chaque bioagresseur ne sera pas proposée ici mais nous présentons un tableau de synthèse en **Annexe 3**. Pour chaque bioagresseur, le nom de l'organisme responsable, le cycle de développement, les symptômes observés, et les mécanismes de dommages sont renseignés. Le cycle de développement sera résumé selon trois indicateurs : le mode de conservation (allo-inoculum ou endo-inoculum), le mode de dispersion et la dynamique de développement (monocyclique ou polycyclique). Lepoivre, 2003, Wiese, 1987, Agrios, 1997, Campbell, 1990, INRA, 1998, INRA, 2008 ont permis de produire cette synthèse.

La **Figure 6** représente les périodes d'expression des symptômes des bioagresseurs, en fonction des stades de développement du blé.

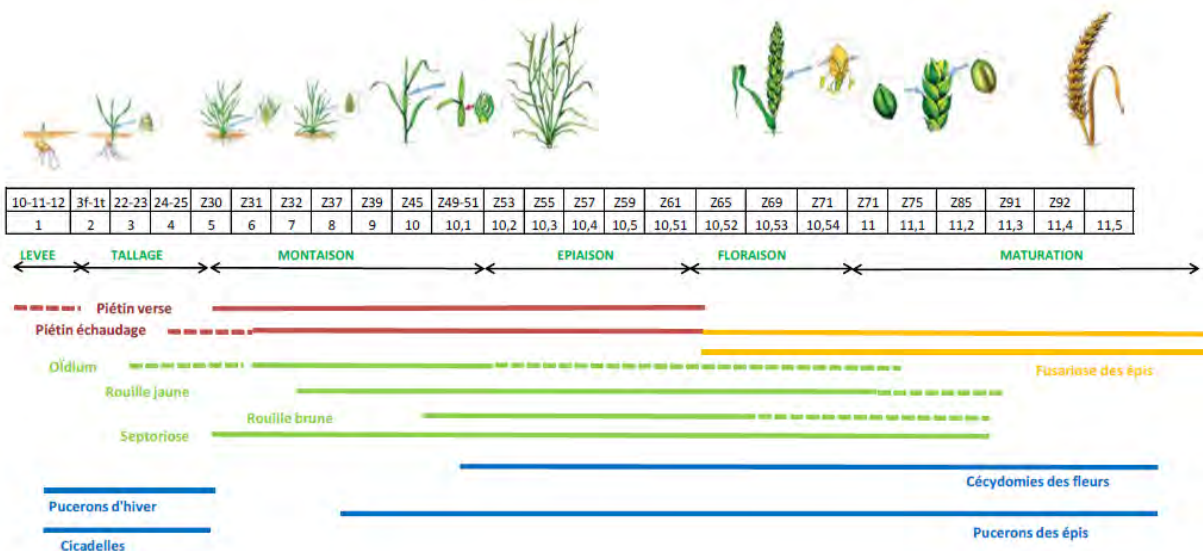


Figure 6 : Répartition des dégâts de bioagresseurs selon les stades de développement du blé (Echelle de Zadoks et de Feekes)

4. Modes de production et de protection

4.1. Les pratiques culturales sur le blé d'hiver

L'enquête réalisée par le SCEES (service statistique du Ministère agriculture) sur les pratiques culturales des agriculteurs en grandes cultures et prairies en 2011 fait suite à celles réalisées en 1986, 1994, 2001 et 2006. Elle couvre 92 % des surfaces nationales en blé tendre et elle nous renseigne sur toutes les interventions culturales réalisées. Elle constitue un outil majeur de description des pratiques des exploitants agricoles. Le **Tableau 3** en résume les principaux points.

Libellés	Critères d'appréciation	Blé tendre	blé dur
Rendements moyens	q/ha	70	49
Choix de la rotation	Principaux précédents	céréales (21%) maïs (24%) colza (22%) tournesol (8%)	blé dur (31%) tournesol (28%)
Culture intermédiaire	Surface en %	0.9	0
Travail du sol avant semis	Surfaces labourées (%)	56	42
	Surfaces non labourées (%)	40	54
	Semis direct (%)	4	4
Traitement de semences	Part de semences traitées (%)	94	95
Date de semis		74% semés entre le 1er et le 31 octobre	50% semés avant le 30 octobre et 35% entre le 1er et le 15 novembre
Dose de semis	kg/ha	142	153
Fertilisation	Azote minéral (kg/ha)	159	175
	Surface recevant un apport organique (%)	11	4
	Phosphore minéral (kg/ha)	20	28
	Potasse minérale (kg/ha)	13	10
Irrigation	Part de la surface irriguée (%)	6	25

Tableau 3 : les pratiques culturales sur le blé en 2011. (Agreste, 2013c)

4.2. Les méthodes de lutte et la consommation de pesticides

4.2.1. La contribution du blé à la consommation de pesticides en France

L'étude Ecophyto R&D menée par l'INRA en 2009 sur 9 grandes cultures, enquêtées par le SCEES en 2006 et représentant près de 90% de la surface occupée par les grandes cultures françaises, a permis de caractériser leur niveau de dépendance aux pesticides. La variable principale considérée pour cette évaluation est l'IFT⁴, Indice de Fréquence de Traitement. Toutes les cultures ne participent pas à la même hauteur à la pression phytosanitaire : leur contribution dépend de leur IFT moyen et de la surface qu'elles occupent sur le territoire (**Figure 7**).

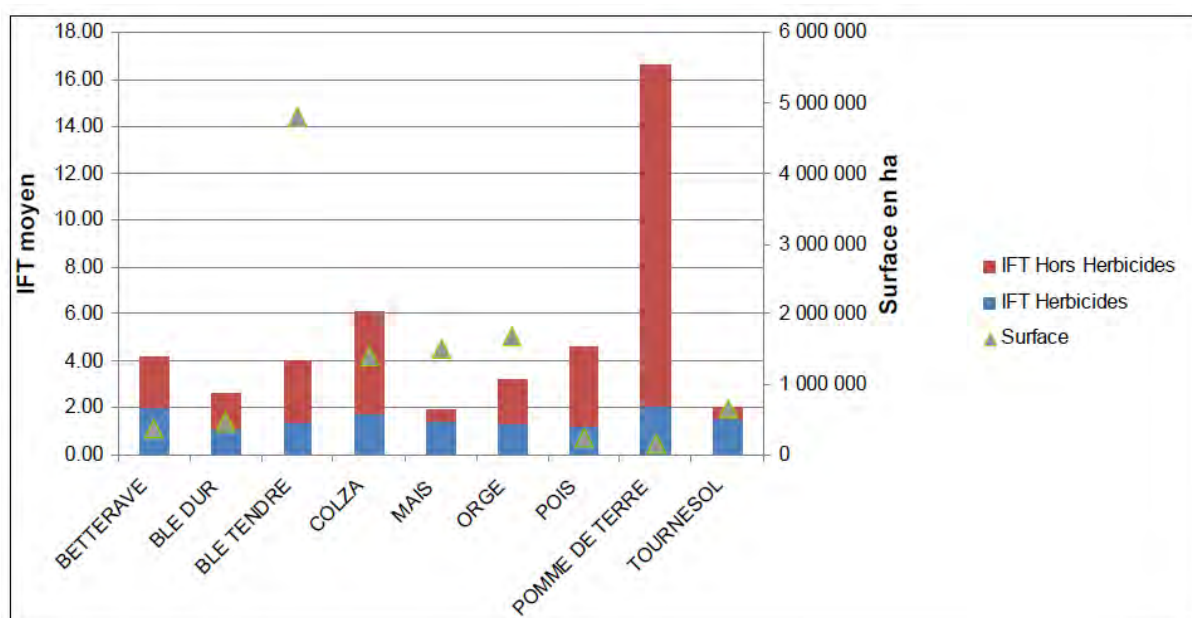


Figure 7 : Contribution moyenne à la pression d'utilisation des pesticides et surfaces cultivées correspondant à l'assolement des cultures en 2006 (INRA, 2009).

De cette étude, il ressort quelques enseignements sur la contribution du blé à la consommation de pesticides :

⁴ L'IFT comptabilise le nombre de doses homologuées appliquées sur une parcelle pendant une période donnée. La dose homologuée est définie comme la dose efficace d'application d'un produit sur une culture et pour un organisme cible. L'IFT d'une parcelle est donc égal à la somme des quantités normalisées de produits pour tous les traitements réalisés sur la parcelle (INRA, 2009).

- en grandes cultures, 75% de l'utilisation des produits phytosanitaires (toutes catégories confondues) est le fait des céréales à paille (blé tendre et orge) et du colza, qui totalisent 70% des surfaces ;
- 80% des fongicides sont appliqués sur 3 cultures qui totalisent 59% des surfaces : blé tendre surtout (à cause de l'importance des surfaces emblavées), et dans une moindre mesure orge et pomme de terre ;
- Les céréales représentent 59% de la contribution à l'EDP (Equivalent Dose Pleine, soit l'IFT exprimé sur la surface développée) grandes cultures en France, dont 44% par le blé tendre et 12% par l'orge (**Figure 8**)

Espèce	Surface (Ha)	IFT - Tous produits	IFT - Herbicides	IFT - Fongicides	IFT - Insecticides	IFT - Autres produits
Blé tendre	4 794 080	4,0	1,4	1,6	0,3	0,7
Blé dur	452 655	2,6	1,1	1,2	0,2	0,2
Orge	1 669 260	3,2	1,3	1,2	0,2	0,5

Figure 8 : Contribution des différentes céréales à l'utilisation des produits phytosanitaires (INRA, 2009)

Le blé tendre représente la plus grande surface cultivée en céréales mais aussi la plus consommatrice de pesticides par hectare cultivé au sein des céréales à paille (IFT=4 en 2006 et 5.1 en 2008). Le principal poste de traitement pour cette culture est constitué par les fongicides, ce qui est cohérent avec le fait que les maladies sont les bioagresseurs majeurs du blé.

L'IFT blé dur est plus faible en raison de sa localisation géographique dans le sud de la France où les conditions climatiques sont moins propices au développement des maladies (2.6 en 2006 et 3.6 en 2008) (INRA, 2009 ; MAAF, 2013).

4.2.2. Les pratiques actuelles de protection sur blé

Le blé tendre d'hiver, cultivé sur l'ensemble du territoire métropolitain, occupe un cinquième des superficies de grandes cultures et de prairies. Il utilise deux cinquièmes des quantités d'azote minéral et un tiers des produits phytosanitaires

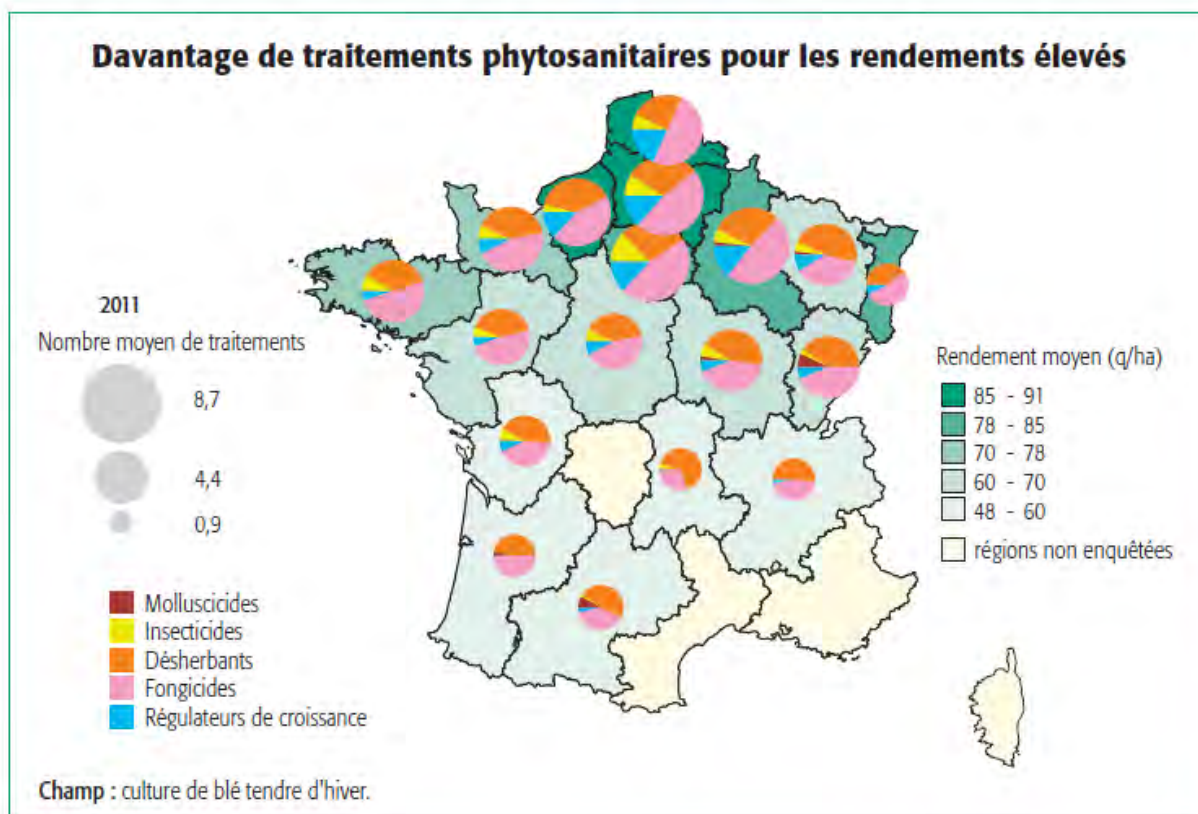
apportés à ces superficies. En 2011, sur un hectare de blé tendre d'hiver et pour un rendement moyen de 70 quintaux par hectare, les cultivateurs ont apporté en moyenne 154 kg à l'hectare d'azote minéral et ont appliqué 5.8 produits phytosanitaires en différents passages (soit 5.8 traitements phytosanitaires⁵) : 2.7 fongicides, 2.1 herbicides, 0.6 régulateur de croissance et 0.4 insecticide (respectivement 1.8, 1.7, 0.2 et 0.2 pour le blé dur). Ce nombre a peu évolué depuis 2006 (6.2 traitement en moyenne). Les traitements fongicides apparaissent en baisse en 2011 par rapport à 2006, sans que cela soit significatif : 89 % des surfaces traitées en 2011, contre 95 % en 2006 (Agreste, 2013d).

Pour le blé tendre environ 90 % des surfaces sont traitées avec au moins un fongicide, cette proportion étant de 80 % pour le blé dur. Au moins un herbicide est appliqué sur respectivement 96 et 88% des surfaces de blé tendre et de blé dur. Seul un tiers des surfaces de blé tendre reçoivent des insecticides, avec également de fortes variations régionales et moins de 20% des surfaces de blé dur (Agreste, 2013c).

Que ce soit pour les pratiques ou pour la consommation de pesticides, les résultats globaux à l'échelle de la France ne permettent pas d'appréhender la variabilité régionale. Le nombre total moyen de traitements phytosanitaires est variable selon les régions : les conditions pédoclimatiques, les pressions sanitaires et les pratiques différentes contribuent à expliquer cette variabilité importante. Ainsi, la région Provence-Alpes-Côte d'Azur applique 1 traitement phytosanitaire en moyenne pour le blé dur alors que la région Centre en applique 5.5, en lien avec le potentiel de rendement et l'impact du climat sur certaines maladies majeures (septoriose, piétin verse) (Agreste, 2013e).

Le nombre de traitements phytosanitaires est plus important pour les surfaces aux rendements élevés ($>80\text{q ha}^{-1}$) : 3.5 traitements de plus en moyenne que pour celles à rendements bas ($\leq 60\text{q ha}^{-1}$) (**Figure 9**).

⁵ Traitement phytosanitaire : produit appliqué lors d'un passage. Un produit appliqué en deux fois compte ainsi pour deux traitements, un mélange de deux produits compte également pour deux traitements. Le nombre moyen de traitements par hectare ne prend pas en compte les doses épandues lors de chaque passage (comme l'IFT). Or certaines cultures peuvent être traitées par plusieurs passages à faibles doses alors que d'autres sont moins souvent traitées mais avec des doses plus importantes à chaque passage.



Source : SSP - Agreste - Enquête pratiques culturales - grandes cultures et prairies 2011

Figure 9 : Nombre moyen de traitements phytosanitaires en fonction des rendements régionaux (Agreste, 2013d)

Au-delà des potentiels de rendement, la diversité de la pression sanitaire joue un rôle sur le nombre des traitements. La durée plus longue du cycle végétatif en zone nord (284 jours, contre 272 en zone centrale et 258 jours en zone sud) accroît le risque de maladies et, dans un climat plus humide et plus frais, le risque plus spécifique de septoriose. *A contrario*, les surfaces des zones à fort ensoleillement en début de printemps sont moins sensibles aux attaques fongiques. Le nombre de traitements fongicides varie de 2.2 en zone sud à 3.5 en zone nord. Si l'on raisonne sur l'IFT fongicide du blé tendre, la **Figure 10** laisse entrevoir une nette distinction entre France septentrionale et méridionale (Agreste, 2009).

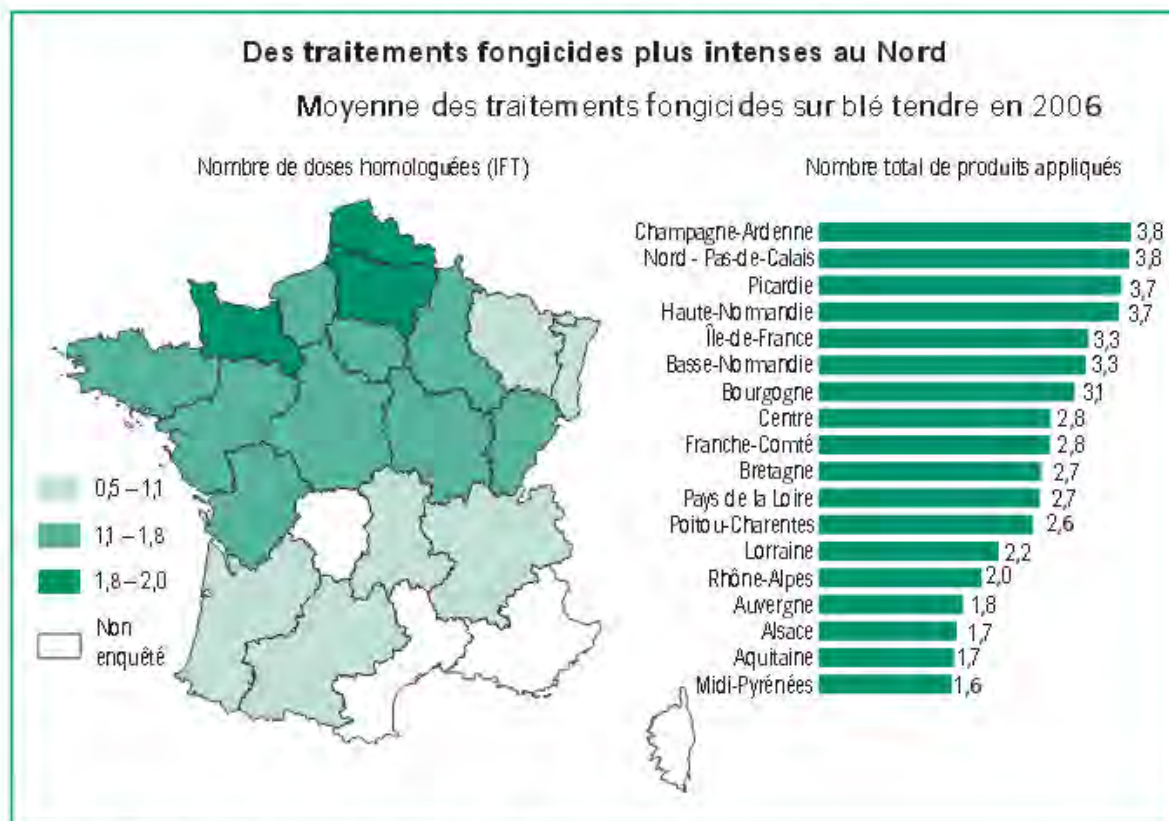


Figure 10 : intensité des traitements fongicides en fonction des régions françaises

Les fongicides sont principalement utilisés pour lutter contre la septoriose maladie la plus commune. Les maladies visées en 2011 sont ensuite, dans l'ordre, les rouilles jaune et/ou brune, la fusariose et le piétin verse. Les autres maladies comme l'oïdium sont des cibles plus ponctuelles (Agreste, 2013e).

Même si seulement un millier d'exploitations sont certifiées « Agriculture raisonnée », on peut penser que la majorité se situe dans une démarche de protection raisonnée, en respectant ses principes soit « en utilisant les méthodes culturales et biologiques disponibles, en choisissant les variétés les plus adaptées, en ne faisant usage des produits phytosanitaires que lorsque cela est nécessaire et justifié et en fractionnant, de manière adaptée, les traitements, de façon à minimiser les quantités de produits phytosanitaires utilisées » (MAAF, 2002). Par contre, il paraît impossible de chiffrer le nombre de fermes adhérant aux principes de la Protection Intégrée car aucune structure officielle n'organise ce mode de production (à la différence de l'arboriculture avec le respect d'une charte PFI Production Fruitière Intégrée). De plus, même si les principes de la PIC sont bien établis, la déclinaison du concept peut parfois paraître

floue ou ambiguë et les déclinaisons pratiques dans les systèmes de culture sont multiples et difficilement classables (Ohmart, 2009).

Quant au blé tendre cultivé en Agriculture Biologique, environ 47827 ha ont été recensés en 2012 (surfaces en conversion comprises), soit près de 1% des surfaces de blé en France (Agence bio, 2012). Dans ce système de production, la protection est basée sur des méthodes de contrôle cultural et génétique et de lutte mécanique contre adventices.

5. Un objet de réflexion pour la PIC

Le blé est au centre de nombreuses réflexions sur la réduction des pesticides et la mise au point de systèmes moins dépendants aux intrants.

L'étude R&D Ecophyto (INRA, 2009) "groupe grandes cultures" avait pour objet de mobiliser et synthétiser les références existantes sur les itinéraires techniques et systèmes de culture actuels et économes en pesticides. Ainsi, une simulation des effets de la mise en œuvre de différents scénarios de culture a été faite. Dans ces scénarios, appelés « niveaux de rupture » plusieurs combinaisons de stratégies de conduite de culture et de successions de culture sont testées. Le but étant d'évaluer les potentialités de réduction de l'utilisation des pesticides en France. Les 7 niveaux de référence retenus, dont 5 niveaux dits "de rupture", sont présentés dans le **Tableau 4.**

Rupture	Qualificatif	Stratégie mise en œuvre	Sources de données ⁽¹⁾
Niveau actuel	Pratiques actuelles "moyennes"	Le niveau actuel représente la diversité des individus de la "ferme France"	Enquêtes "Pratiques culturelles" SCEES 2006 (moyennes et variabilités des pratiques)
Niveau 0	Pratiques "intensives"]	Pas de stratégie de réduction des pesticides, logique d'"assurance"	Idem ; sous-population des 30% de parcelles ayant les pratiques les plus consommatrices de pesticides
Niveau 1	Agriculture « raisonnée »	Raisonnement de chaque intervention sur la base d'observations et déclenchement des traitements sur la base de seuils	Conseils Chambre et données du réseau Farre
Niveau 2a	Itinéraire technique économe en pesticides	Mise en œuvre sur une culture d'une stratégie s'appuyant sur une combinaison cohérente de méthodes de lutte agronomique non chimique et de moyens chimiques afin de limiter le recours aux pesticides	Réseaux expérimentaux
Niveau 2b	Niveau 2a sur l'ensemble des cultures de la succession	Application des principes du niveau 2a à toutes les cultures de la succession. Mais le choix des termes de la succession ne fait pas partie de la panoplie de mesures prophylactiques mises en œuvre.	
Niveau 2c	"système de culture intégré"	Chaque culture de la succession est conduite selon les principes du niveau 2a et le choix des termes de la succession fait partie de la panoplie de mesures prophylactiques	Expertise, réseaux de fermes (Bourgogne, Eure, Picardie)
Niveau 3	Agriculture biologique	Stratégie répondant au cahier des charges de l'agriculture biologique	Arvalis, GRAB

Tableau 4 : les niveaux de références retenus et les stratégies sur lesquels ils se fondent (INRA, 2009)

Les principaux enseignements sur blé tendre sont les suivants :

- Une réduction de l'utilisation des pesticides est permise par la mise en œuvre d'un raisonnement des interventions (niveau 1, étape Efficience de la grille ESR) : il permettrait une réduction de 28% en moyenne sur l'ensemble des zones par rapport au niveau 0 "intensif". Cette réduction touche surtout les fongicides et les insecticides dans une moindre mesure.
- Le niveau 2a (étape Substitution de la grille ESR) permettrait d'aller beaucoup plus loin dans la réduction, avec une moyenne de 56% de réduction de l'utilisation par rapport à l'intensif. Il s'accompagnerait d'une perte de rendement plus importante de l'ordre de 10% en moyenne. A ce niveau de rupture, ce sont toujours les fongicides et les insecticides qui sont concernés par la réduction. C'est pour ce niveau de rupture que les données sont les plus nombreuses et les plus anciennes. Initiées par Meynard en 1985, des expérimentations sur la conduite d'itinéraires techniques économes en pesticides et en azote (dits "bas intrants") combinés à des variétés Rustiques, se sont structurées autour d'un réseau multilocal et pluriannuel : réseau « Blé Rustique » (Loyce et al., 2012, Loyce et al., 2008, Zhang et al., 2007, Rolland et al., 2003). Des expériences de mise en œuvre d'itinéraires techniques économes

en pesticides menées chez les agriculteurs existent déjà en France même si elles restent plutôt confidentielles ramenées au nombre d'agriculteurs impliqués et aux surfaces concernées (par ex., en Picardie auprès de 8 agriculteurs depuis 2002 (Mischler, 2009), l'autre en Bourgogne auprès de 4 agriculteurs depuis 2003 (Briard, 2007).

- Le niveau 2c (étape Reconception de la grille ESR) permettrait de rajouter à ces réductions celle (modérée) des herbicides. Avec ce mode de conduite, l'utilisation des pesticides sur blé tendre serait diminuée de 63% par rapport au niveau 0. Il est important de préciser que ce mode de conduite s'accompagne aussi de successions de cultures (et donc d'assolement) différentes. Des expériences de mises en œuvre de ces stratégies à l'échelle du système de culture restent relativement rares sur quelques expérimentations systèmes de culture de longue durée (PIC adventices à l'INRA de Dijon (Dongmo et Munier-Jolain, 2011, Chauvel et al., 2011, Deytieux et al., 2012), ferme expérimentale d'Arvalis à Boigneville), et des résultats de mises en œuvre plus récentes de ces stratégies chez des agriculteurs. De même, des réseaux d'expérimentations se mettent en place dans le cadre du RMT "Systèmes de culture innovants"(RMT Systèmes de Cultures Innovants, 2013). L'émergence de démarche de co-construction de système de culture est aussi à relever puisqu'elle participe à la conception de modes de production innovants à l'échelle de la succession des cultures (Reau et Doré, 2008).

Néanmoins, dans toutes ces études, tous les leviers susceptibles de pouvoir réduire les pressions biotiques et la consommation de pesticides n'ont pas forcément été pris en compte dans leur combinaison possible (dimension verticale de la PIC), et le niveau des dégâts dus aux principaux bioagresseurs (dimension horizontale de la PIC) est rarement étudiée dans l'évaluation finale des systèmes testés.

Chapitre 4. Démarche adoptée pour la thèse

Comme nous l'avons développé précédemment, très peu de travaux de modélisation s'intéressent à l'approche systémique de la protection et prennent en considération les dimensions horizontale et verticale de la PIC. Il semble pourtant incontournable de devoir privilégier cette approche compte tenu des enjeux futurs de la production agricole. Il nous a donc semblé pleinement justifié de retenir cette démarche en choisissant d'appréhender et de modéliser la diversité et la complexité du profil de bioagresseurs au sein d'un agrosystème afin de proposer des stratégies de gestion intégrée moins dépendante des pesticides.

1. Les objectifs de la thèse

- Le premier objectif de la thèse est **l'analyse des effets de l'interaction entre le système de culture et la situation de production sur le profil de dégâts sur blé d'hiver**. Afin de permettre la réalisation de cet objectif ambitieux dans le cadre d'une thèse, le choix a été fait de ne pas embrasser l'ensemble de la complexité des agroécosystèmes abordés. Tout d'abord, l'échelle d'espace considérée sera celle de la parcelle, même si certaines dynamiques biotiques ont lieu à des échelles supérieures. Si le travail sera conduit à cette échelle, les effets des niveaux supra-parcellaires pourront néanmoins être intégrés au travers de variables simples décrivant les effets des espaces interstitiels et du territoire (représentation non explicite). De même, l'échelle temporelle abordée sera celle de l'itinéraire technique, même si l'effet du précédent voire de l'antécédent devra être pris en compte pour les organismes endocycliques. Nous avons choisi de considérer la culture du blé comme étude de cas du fait de sa contribution forte à l'utilisation des pesticides au niveau national, mais aussi parce que les connaissances scientifiques disponibles sont nombreuses (notamment en termes de références pour la conduite du blé, de modélisation de son écophysiologie, et de ses bioagresseurs). Au-delà des avancées sur la protection intégrée du blé, les enjeux tant conceptuels que méthodologiques portés par le projet se veulent aussi des objectifs de généralité de manière à pouvoir être facilement adaptée à d'autres cultures. Pour cela, un cadre conceptuel générique pour la gestion des bioagresseurs sera développé.

- Le second objectif de la thèse se concentre sur le **développement d'un outil de simulation** permettant de représenter les interactions au sein des agroécosystèmes conduisant à différentes pressions biotiques. A terme, cet outil, combiné à un modèle de nuisibilité, pourra contribuer à la conception de systèmes de culture moins à risque vis-à-vis des pressions biotiques et donc moins dépendants des pesticides. Dans cet objectif, un modèle de simulation sera développé et évalué pour représenter les effets de l'ensemble des pratiques agricoles sur les profils de dégâts dans une situation de production donnée, et pour la culture du blé d'hiver (Injury Profile SIMulator-Wheat).

2. Méthode de travail

2.1. Schéma conceptuel, hypothèses de travail, méthode de modélisation

La première étape du travail a donc été de réaliser un schéma conceptuel représentant le fonctionnement d'un agroécosystème et la multiplicité des interactions en son sein (Aubertot et Robin, 2013). Afin de pouvoir appréhender la complexité des dégâts et des régulations biologiques, le système étudié a été restreint au blé d'hiver (tendre et dur) et non à l'ensemble des cultures présentes dans un système de culture.

Le choix de la méthodologie de modélisation s'est porté sur une démarche pouvant intégrer un niveau de complexité élevé, soit un outil s'intéressant aux différentes méthodes de gestion de différents bioagresseurs présents simultanément. L'option retenue a donc été une démarche de modélisation qualitative, qui permet de répondre à l'enjeu de complexité scientifique du champ de l'agroécologie, à l'enjeu de généricité indispensable à la recherche actuelle et à l'enjeu de la simplicité de l'outil pour son appropriation sociale la plus large.

La première hypothèse sous-jacente de ce concept est que la combinaison d'une situation de production (caractéristiques physiques, chimiques, biologiques d'une parcelle et de son environnement) et d'un système de culture (à une échelle pluriannuelle) détermine complètement un profil de dégâts unique. Ce schéma est le

cadre conceptuel du modèle IPSIM (Injury Profile SIMulator (Aubertot et Robin, 2013). Les sorties du modèle sont représentées par les sévérités finales des bioagresseurs et les entrées par les 3 composantes suivantes : les pratiques culturales, le pédoclimat et l'environnement.

Une seconde hypothèse issue de ce concept est donc qu'un profil de dégâts est le résultat des interactions multiples existant au sein de l'agroécosystème et qu'une approche agrégative et qualitative serait la mieux à même de représenter cette complexité.

L'objectif à terme serait qu'IPSIM puisse contribuer à la conception de systèmes de culture à base de blé moins soumis aux pressions biotiques et donc moins sensible aux pertes de rendement, en utilisant les sorties du modèle, soit les profils de dégâts rencontrés dans une situation de production, comme variables d'entrée d'un modèle de simulation de la nuisibilité (**Figure 11**).

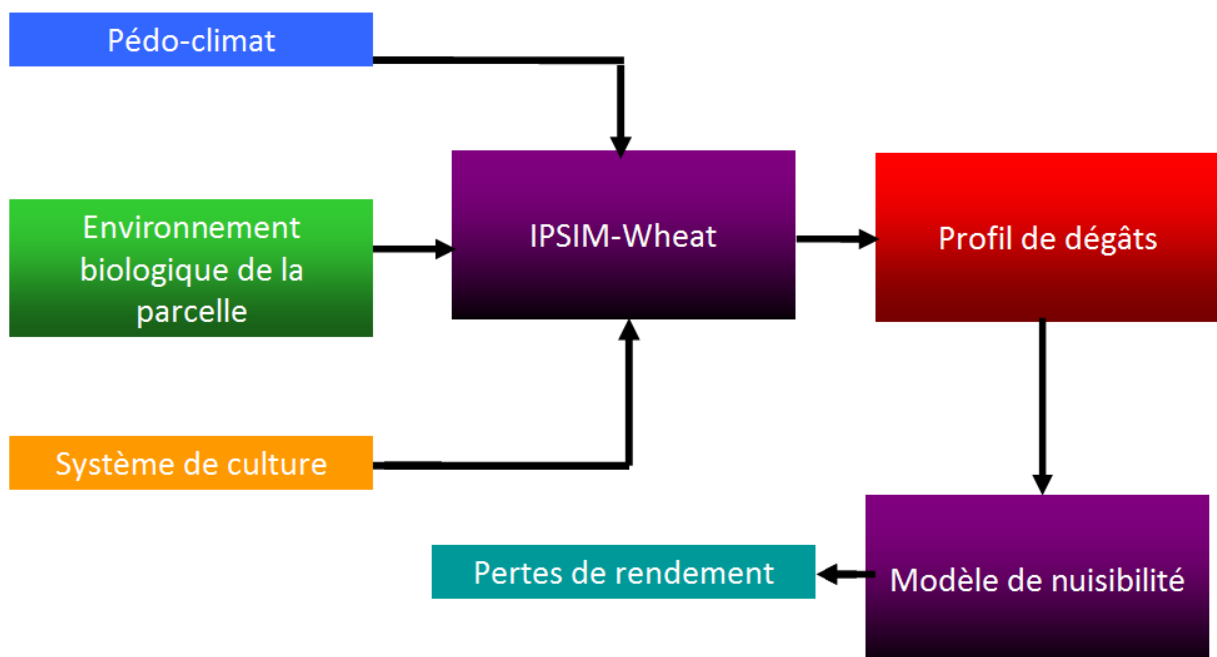


Figure 11 : Couplage d'IPSIM avec un modèle de nuisibilité

2.2. Démarche de construction d'IPSIM

2.2.1. *Bibliographie et expertise*

Afin de pouvoir développer un modèle de simulation à partir du schéma conceptuel IPSIM, des analyses bibliographiques aussi exhaustives que possibles ont été conduites et synthétisées dans des tableaux. La littérature scientifique internationale ainsi que la littérature technique a été analysée afin de pouvoir décrire, comprendre finement et hiérarchiser les effets des facteurs agronomiques, pédoclimatiques et paysagers sur les dynamiques des principaux bioagresseurs du blé d'hiver. L'aide d'experts a pu compléter cette synthèse des connaissances disponibles.

2.2.2. *Construction du modèle sous DEXi*

Les sous-modèles développés dans le cadre du modèle IPSIM ont été réalisés en utilisant la méthode DEX et implémentés avec le logiciel DEXi, logiciel d'analyse et d'évaluation multicritère permettant de prendre des décisions (Bohanec, 2003). Il permet une représentation qualitative et hiérarchique pour l'aide à la décision. DEXi est basé sur la décomposition d'un problème complexe en sous-problèmes plus faciles à évaluer et son champ d'application est très vaste. Cet outil, en général utilisé pour construire des modèles de décision a été utilisé ici de manière originale pour développer des modèles de simulation. Dans notre cas, cette méthode a permis de renseigner un profil de dégâts (sortie du modèle) selon la combinaison de 3 attributs, les pratiques culturales, l'environnement de la parcelle et le pédoclimat. Ensuite, chacun de ces 3 attributs a été décomposé en différents attributs, eux-mêmes décomposés en attributs de base (entrées du modèle) décrits à un niveau inférieur (structure en arborescence).

Les attributs de base sont des variables qui permettent de renseigner d'autres variables en utilisant une fonction d'agrégation (de type : « si...alors ... »). Les fonctions d'agrégation sont présentées sous forme de tables et les attributs de base sont renseignés de manière qualitative (variables nominales ou ordinales) ou quantitatives (variables intervalles).

Rappelons que les variables retenues, les valeurs de classe, et les fonctions d'agrégation ont été identifiées et caractérisées grâce à la bibliographie et à l'expertise. Seuls les facteurs facilement renseignés et ayant des conséquences majeures sur les bioagresseurs ont été retenus.

Ainsi une structure générique quelle que soit la culture visée, IPSIM, a été développée (Aubertot et Robin, 2013).

Afin de représenter le profil de dégâts sur la culture retenue, le blé d'hiver, il a été nécessaire de concevoir par la suite autant de sous-modèles que de bioagresseurs principaux du blé d'hiver en mobilisant la structure IPSIM décrite précédemment.

D'après le travail bibliographique décrit précédemment, nous avons donc retenu comme organismes les plus préoccupants en termes d'occurrence et d'évolution de fréquence les 12 bioagresseurs du blé d'hiver suivants.

Parmi les **maladies** :

- le piétin-verse
- le rhizoctone
- le piétin-échaudage
- la fusariose de la tige
- l'oïdium
- la septoriose
- la rouille jaune
- la rouille brune
- la fusariose des épis
- la jaunisse nanisante de l'orge transmise par les pucerons d'automne

Parmi les **ravageurs** :

Les pucerons de printemps

Les **adventices** à envisager dans leur globalité bien qu'elles regroupent une grande diversité.

Une planche de photographies représentant les symptômes des bioagresseurs retenus pour ce travail de thèse est également consultable en **Annexe 4**.

Ces 12 sous-modèles ont été ou sont en voie de construction. Ils seront réunis en un modèle final IPSIM-Wheat, en tenant compte des interactions potentielles connues entre organismes (Aubertot et Robin, 2013).

Le modèle complet IPSIM-Wheat permettra ainsi d'appréhender les dimensions verticales et horizontales de la PIC pour un meilleur contrôle du profil de dégâts sur blé d'hiver.

2.2.3. Recueil des données

- Une base de données nationale pour les principaux bioagresseurs du blé a été constituée. Elle servira par la suite à l'évaluation du modèle.

Elle devait regrouper des résultats croisant et recoupant des données sur les pratiques culturales et les bioagresseurs du blé. Les données collectées devaient permettre de fournir :

Des valeurs d'entrée du modèle (ou variables explicatives) se décomposent selon 3 modules : le pédoclimat, les pratiques culturales et l'environnement biologique.

Des valeurs de sorties du modèle (ou variables expliquées) en terme de sévérité finale pour chaque bioagresseur retenu.

Dans un premier temps, le travail a consisté à inventorier, recueillir et classifier les données existantes au niveau national puis à les sélectionner selon un cahier des charges établi d'après les exigences du modèle (Cholez, 2011). Un travail de compréhension et d'homogénéisation des données a été nécessaire afin de pouvoir les utiliser comme valeurs pour le modèle. Par la suite, les variables quantitatives ont du être traduites en variables qualitatives pour être intégrées dans les sous-modèles.

Cette base de données a été constituée à partir de résultats expérimentaux provenant de centres de recherche ou d'expérimentation, d'instituts techniques, d'associations et groupements d'agriculteurs, d'entreprises (coopératives ou privées), de réseaux formalisés ou informels.

- Cette base de données nationale, constituée à partir de résultats non conçus dans le cadre de la démarche IPSIM donc souvent incomplets ou inadaptés pour certaines variables, a été complétée par notre propre dispositif d'acquisition des données. L'objectif était de balayer un maximum de situation de production c'est-à-dire d'explorer une large gamme de pratiques croisée à une large gamme de milieu. Pour compléter notre jeu de données destiné à la validation du modèle, nous avons donc choisi de mettre en place, un réseau régional d'observation de parcelles d'agriculteurs en Midi-Pyrénées (et Languedoc-Roussillon), afin de réaliser des enquêtes sur les pratiques culturales et des diagnostics sur les bioagresseurs. Ces diagnostics se sont en général réalisés en synergie avec des réseaux locaux existants.

2.2.4. Évaluation du modèle

Après avoir regroupé et sélectionné les données brutes, un travail de traduction de ces données a dû être entrepris pour les faire correspondre aux attentes du cahier des charges du modèle, en termes d'échelles qualitatives retenues pour les attributs de base. En effet, les données fournies peuvent être de nature très différente et elles doivent pouvoir être prises en compte dans cette diversité. Par exemple pour le blé d'hiver, une densité de semis peut être enregistrée en nombre de grains par hectare, en kilogramme de semence par hectare ou en valeur ordinale, de type dense, élevée, faible. Les échelles retenues pour quelques attributs de base sont synthétisées sur le **Tableau 5**. Certaines échelles utilisent le terme « favorable », il doit alors être compris comme favorable au bioagresseur, et inversement pour « défavorable ».

Ainsi, soit les données recueillies sont des valeurs qualitatives, ordinales ou nominales. Dans ce cas, les valeurs quantitatives ont déjà été appréciées qualitativement par les expérimentateurs en fonction du contexte régional et on admet alors que leur expertise fait foi.

Soit les données recueillies sont quantitatives et dans ce cas, nous avons appliqué des règles de décision, définies pour les régions représentées dans notre jeu de données et reposant sur la littérature grise et l'expertise. Ces règles de décision sont

regroupées dans un « interface », non directement visible pour l'utilisateur mais tout à fait transparent.

Ces données ont été utilisées par la suite pour évaluer la qualité prédictive du sous-modèle construit en comparant les intensités simulées par le modèle avec les intensités réelles. Plusieurs indicateurs statistiques ont été utilisés comme critères d'évaluation.

Attribut de base	Natures possibles de l'attribut fourni	Échelles de l'attribut du modèle	Règle ou description
Niveau de résistance de la variété	Nom de la variété, note de résistance	Assez résistant à résistant/ Moyennement sensible / Très sensible à sensible	Échelle basée sur les notations de résistance établie par le CTPS (Comité Technique Permanent de la Sélection des Plantes Cultivées) lors de l'inscription de la variété.
Travail du sol	Labour, travail simplifié, semis direct, ...	Travail du sol avec inversion / Travail du sol sans inversion	Travail du sol utilisé avant l'implantation du blé et conduisant à une inversion des horizons ou non.
Précédent cultural	Toutes les cultures possibles, prairies, voire jachère, friche, ...	Hôte/Non hôte	La classification des différents précédents en variable qualitative nominale est basée sur des données issues de la synthèse bibliographique.
Date de semis	Jour calendaire, précocité appréciée (précoce, ...)	Précoce/Normal e/Tardive	La classification des dates de semis en variable qualitative ordinale est basée sur des données issues de la littérature technique et de l'expertise régionale.
Climat du printemps	Aucune indication hormis la position géographique, données météo diverses, ...	Favorable/Moyennement favorable/Défavorable	Le climat est caractérisé en se basant sur des modèles existants, des typologies issues de données historiques, ...

Tableau 5 : Exemples de traduction de variables fournies en variables qualitatives pour quelques attributs d'entrée

La description précise du contexte scientifique et socio-économique nous a permis de justifier l'urgence d'adopter une démarche systémique en PIC et la nécessité d'analyser et de modéliser les effets des pratiques culturales sur le fonctionnement des agroécosystèmes afin d'améliorer le contrôle des bioagresseurs. La deuxième partie de ce manuscrit présentera les bases conceptuelles de l'outil générique,

IPSIM, permettant le développement de futurs modèles représentant les profils de dégâts d'une culture donnée en fonction du système de culture, et de l'environnement biotique et abiotique. Une preuve de ce concept sera développée dans la troisième partie pour la culture du blé d'hiver.

Deuxième partie. Injury Profile SIMulator,
a Qualitative Aggregative Modelling
Framework to Predict Crop Injury Profile
as a Function of Cropping Practices, and
the Abiotic and Biotic Environment. I.
Conceptual Bases

Recourir à des solutions alternatives à la lutte chimique, sans l'exclure dans une démarche cohérente assurant l'efficacité de la production tout en réduisant les effets négatifs sur l'homme et l'environnement, est l'objectif de la Protection Intégrée des Cultures (PIC). Pour ce faire, la PIC nécessite donc une intégration verticale de différentes méthodes de contrôle (contrôles cultural et génétique, luttés biologique, physique et chimique) des bioagresseurs, ainsi qu'une intégration horizontale (gestion simultanée des agents pathogènes, plantes adventices et ravageurs).

Les agriculteurs conçoivent leurs systèmes de culture en fonction de leurs connaissances, expériences et objectifs, ainsi que de leur environnement physique, chimique, biologique et socio-économique. Un système de culture donné dans une situation de production donnée, va alors aboutir à un profil de dégâts unique. C'est cette hypothèse, introduite en première partie qui a permis de développer le schéma conceptuel sous-jacent au modèle générique IPSIM (Injury Profil SIMulator). La modélisation nous a semblé l'outil le plus pertinent pour représenter le fonctionnement d'un agroécosystème et pour rassembler et structurer les différentes sources de connaissances mobilisables dans notre travail : analyse bibliographique, expertise, diagnostic en parcelles agricoles, expérimentation, utilisation de modèles existants. Compte tenu de la carence existante en termes de modélisation des profils de dégâts d'une part et des relations entre ces profils et les pratiques culturales d'autre part, nous proposons de développer une méthode innovante de modélisation, avec le modèle IPSIM. De part la complexité des champs cultivés et des multiples interactions en leur sein, une démarche de modélisation qualitative et agrégative a été retenue pour décrire les effets de différents facteurs sur le profil de dégâts.

La méthode de travail s'est organisée en plusieurs étapes qui seront décrites dans cette partie :

- la représentation conceptuelle d'un agroécosystème et des interactions, étudiées de manière privilégiée dans le travail de thèse,
- l'analyse de ces interactions par la littérature et l'expertise,
- la construction du modèle générique IPSIM implémenté sous le logiciel DEXi,
- un exemple de son application pour une culture donnée, le blé d'hiver.

La deuxième partie de ce manuscrit présente donc les bases conceptuelles de l'outil générique, IPSIM, permettant le développement de futurs modèles représentant les profils de dégâts d'une culture donnée en fonction du système de culture, du pédoclimat et de l'environnement de la parcelle. Une preuve de concept sera présentée dans la troisième partie de ce manuscrit dans le cas d'une maladie importante du blé, le piétin-verse. D'autres modules seront également décrits dans la partie suivante pour d'autres bioagresseurs du blé de natures diverses.

Injury Profile SIMulator, a hierarchical aggregative modelling framework to predict crop injury profile as a function of cropping practices, soil, climate and field environment. I. Conceptual bases.

Jean-Noël Aubertot^{1, 2}, Marie-Hélène Robin^{1, 3}

Published online in PLoS ONE September 2013, volume 8, issue 9, e73202
(Annexe 5).

¹ INRA, UMR 1248 AGIR, F-31320 Castanet-Tolosan, France

² Université Toulouse, INPT, UMR AGIR, F-31029 Toulouse, France

³ Université Toulouse, INPT El Purpan, F-31076 Toulouse, France

1. Introduction

Third millennium agriculture must reconcile environmental protection and productivity. The world population is projected to reach 8.7-10 billion by 2050 and annual production will need to increase by 200 million tons by then to meet the projected 470 million ton demand [1]. Several authors attribute the spectacular increase of agricultural production in the second half of the twentieth century to the massive use of products resulting from chemical synthesis [2]; but this intensive production model is nowadays questioned because of public health, agronomic, environmental, and sometimes socio-economic issues. Concepts in crop protection in intensive agricultural production systems changed from destruction of pests (by which we mean Weeds, plant pathogens and animal pests in this paper) by the use of pesticides to pest management with techniques based on the improved knowledge of pest dynamics and their natural enemies and the interaction between pests and crops under the influence of Cropping Practices (CP) [3]. It is therefore necessary to combine cultural, genetic, biological, physical and chemical control methods to

manage pests through Integrated Pest Management (IPM) strategies in order to maintain the pest population levels below those causing economic losses [4].

True IPM is quite different from the practices recommended up to now [5] and is still faced with agronomic and technical difficulties which can curb its development. Its impact on pests is difficult to estimate because of their multiplicity and of their many interactions within agroecosystems. Studies on the effects of alternative control methods mostly concern a major pest (monospecific approach) while farmers have to manage an Injury Profile (IP) in a given field, i.e. a combination of injury levels caused by multiple pests (multi-specific approach) [6]. Similarly, the research has focused on the effect of one (or a few) control methods, but farmers usually combine several operations (which may have only partial effects) to limit pest development. Each technical operation is likely to modify the sanitary status of a crop [7]. In addition, not only do cultural practices interact with each other, but also, one technique can be detrimental to some pests and favourable to others. Pest populations are characterised by a very high level of diversity and complexity because of multiple interactions within and between populations and with biological, physical, and chemical environments. This complexity is one of the constraints to the implementation of IPM, in addition to others [8]. In order to reduce the reliance of cropping systems on pesticides, it is therefore necessary to develop tools to help the "vertical integration" (combination of several control methods) and the "horizontal integration" (simultaneous management of several pests) of IPM strategies. Dynamics of pest populations can lead to combinations of injuries on a crop which can in turn lead to quantitative or qualitative damage, which usually results in economic losses for farmers and more generally for society as a whole. However, these relationships are not linear and depend on the Production Situation (PS) as shown by several authors [6, 9, 10]. In this paper, we will assume that the PS is defined by the physical, chemical and biological components, except for pests, of a given field (or agroecosystem) and its environment, as well as socio-economic drivers that affect farmer's decisions (adapted from [11]). In this definition, the term "environment" refers to the territory (i.e. landscape and the associated actors) that can directly or indirectly influence the field concerned. In a given PS, a farmer can design several cropping systems according to his goals, his perception of the socio-economic context and his environment, farm organisation, knowledge and his

cognition. However, a given cropping system in a given PS will be assumed to lead to a unique IP.

In order to help design cropping systems, modelling is a key tool [12]. However, because of the complexity of agro-ecosystems, models usually only address a limited part of agroecosystems. Crop models have been developed for decades but do not take into account interactions with pests (e.g. [13, 14]). Epidemiological models *sensu lato* have been developed to represent pest dynamics, often to help decision making. However, these models usually take into account rather poorly the critical effects of CP [15] due to their multiple consequences on the crop-pest-environment dynamics [16]. In addition, the majority of these models address single pests (except for models such as EIPRE [17, 18]). So far, the only models that consider IP are damage models [19, 20]. However these models do not predict IP but the quantitative damage that they cause. There is thus a strong need to develop an innovative approach to predict IP as a function of PS and CP. Because of the complexity of the considered systems [21], and the lack of representation of the effects of CP and their interactions, the linkage of available crop models to epidemiological models seems unlikely to happen when considering multiple pests [3]. Even if a crop model was available, together with epidemiological models for diseases, Weeds and animal pests, taking into account the crop status and the effects of CP, attempting to link them would certainly lead to a dead end because of the propagation error phenomenon as well as the large number of parameters and input variables needed. Alternatively, one could consider statistical approaches to cope with the impossibility of addressing these issues when using mechanistic models. However, datasets with observed IP, cropping systems and PS are scarce and statistical approaches are thus even more unlikely to succeed than mechanistic modelling approaches. As an alternative, a generic modelling framework, called IPSIM for Injury Profile SIMulator is proposed. It is deliberately simple in the way mechanisms are represented because the system being described, i.e. the agroecosystem, is far too complex for a truly mechanistic representation. It is based on a simple hierarchical aggregative qualitative approach to represent the effects of various factors affecting IP. This paper presents the basic principles of IPSIM, describing its implementation in a software program and providing an example of its specification for a given crop. A

companion paper [22] provides a proof of concept of this innovative modelling approach in the field of crop protection for an important disease of wheat.

2. Materials and Methods

2.1. Basic principles of IPSIM

Figure 12 is a schematic representation of an agroecosystem. This figure is the conceptual basis of IPSIM, although its scope is broader than the system directly addressed by IPSIM. According to the farmer's goals, his farm features, his perception of the environment and of the socio-economic context, as well as his knowledge and cognition, he designs cropping systems that will achieve social, economic and environmental performances, as a function of the PS. These performances will be highly dependent on the IP. The term "cropping system" refers here to "a set of management procedures applied to a given, uniformly treated area, which may be a field, part of a field or a group of fields" [23]. This covers many things, including, for instance, the choice of the crop sequence, cover cropping, cultivar, tillage practices, date and density of sowing, rate of fertilisation and chemical pest control. The term "system" is used here because these technical choices are inter-dependent [24].

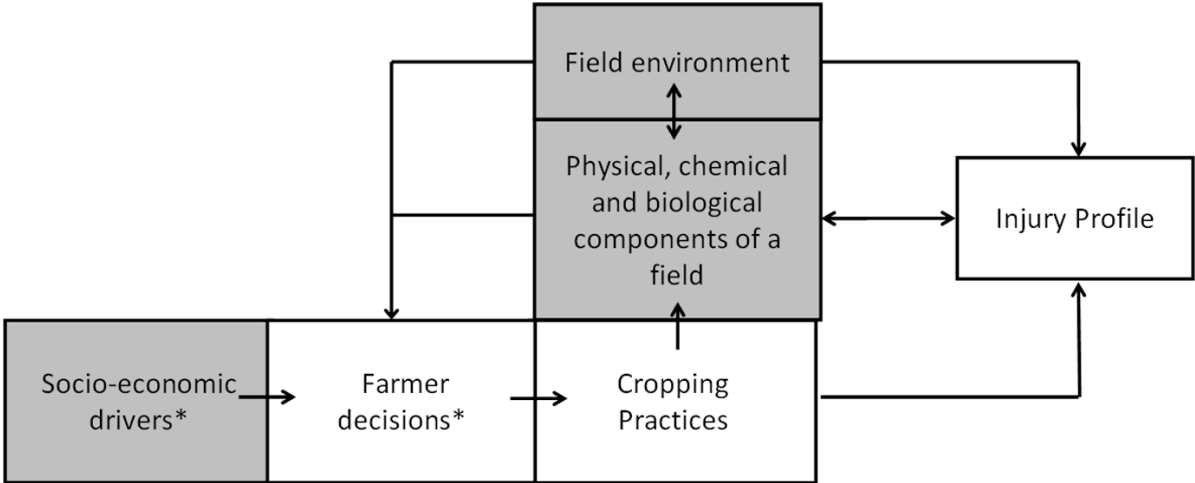


Figure 12 : Schematic representation of an agroecosystem and its drivers. In grey: components defining the Production Situation. The IP is the output variable of IPSIM, whereas its input variables are included within the three following components: CP, field environment, and physical, chemical and biological components of the field. * Not taken into account in IPSIM.

IPSIM is embedded in **Figure 12**, where the IP is its output variable. Input variables of IPSIM are embedded within the three following components: CP, field environment, and physical, chemical and biological components of the field (crop, pests, beneficial and harmless living organisms). An IP can thus be seen as the result of hierarchical interactions among the CP and PS. Qualitative Aggregative hierarchical approaches have been used in several fields to help assess the performances of various options when managing a system: industry (e.g. [25, 26]), soil science (e.g. [27]), tourism (e.g. [28, 29]). In the field of agronomy, aggregative hierarchical models have been used to assess the sustainability of cropping systems *ex-ante* or *ex-post* [30-32], the assessment of organic systems [33], the management of Genetically Modified crops (e.g. [34]), the assessment of less-favoured areas for agricultural production (e.g. [35]), the evaluation of energy crops for biogas production (e.g. [36]), the assessment of varieties or cultivars (e.g. [37, 38]) and the assessment of the effects of market-gardening cropping systems on soil borne pathogens and animal pests using expert knowledge of advisors [39]. We used this approach to summarise available knowledge in the literature for a given crop and to develop a generic modelling framework for IPM.

2.2. Implementation of IPSIM with a software program

IPSIM was developed using the DEX method, and is implemented with the DEXi software ([40], <http://www-ai.ijs.si/MarkoBohanec/dexi.html>). DEX is a method for qualitative hierarchical multi-attribute decision modelling and support based on a breakdown of a complex decision problem into smaller and less complex sub-problems. This tool is generally used to evaluate and analyse decision problems [27, 29, 41]. In this study, it is used for the first time to develop a simulation model that represents the behaviour of an agroecosystem and which quality of prediction can be assessed. The modelling framework has the following features [40]. The sub-problems are hierarchically structured into a tree of attributes that represents the “skeleton” of the model. Terminal nodes of the tree, i.e. leaves or basic attributes, represent input variables of the model (and must be specified by the user). The root node represents the main output: an overall assessment of the evaluated scenarios (an IP which is defined by CP and elements of the PS in this case). The internal

nodes of the model are called aggregated attributes. All the attributes in the model are qualitative (ordinal and nominal) rather than quantitative (interval) variables. They take only discrete symbolic values usually represented by words. The aggregation of values up the tree is defined by utility functions for each aggregate attribute based on a set of "if-then" aggregation rules.

2.3. IPSIM structure

The process of building a DEXi model usually involves the following four steps [40]: (1) identifying the attributes, (2) structuring the attributes, (3) defining attribute scales, and (4) defining the utility function. These steps should be followed for the development of IPSIM using the diagram presented **Figure 12**. However, only the first three steps can be carried out in a generic way. Only the generic utility functions will be described here since most of them are crop-specific.

2.3.1. Structure of the attributes used to predict IP

The structure of attributes that predict IP is presented in **Figure 13**. Each pest can have only seven levels of severity (nil, very low, low, medium, high, very high and maximum). Even if only 10 pests are considered for a given crop, a theoretical number of $7^{10} = 2.82475249 \times 10^8$ possible IP could be simulated with IPSIM. This number is only theoretical since some of these IP are impossible due to interactions among pests. In order to take into account interactions among pests, IPSIM first calculates the severity for single pests independently, as if one pest only was present (**Figure 13**).

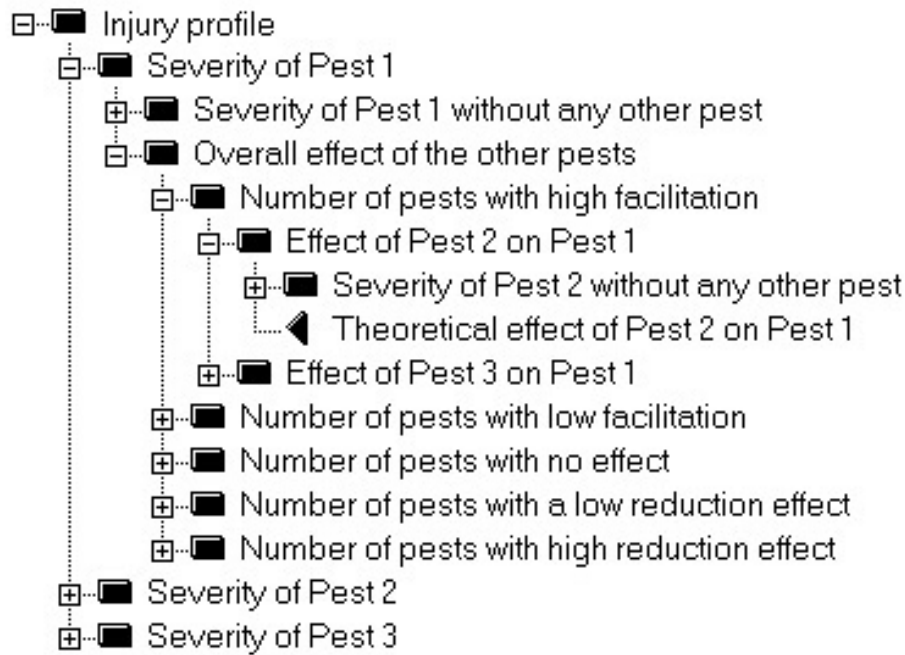


Figure 13 : Overall output attributes of IPSIM: description of an IP (screenshot of the DEXi software). For the sake of simplicity, only 3 pests are represented in this figure. The severity of a given pest is first calculated independently by IPSIM as if no other pest was present. The aggregated severity of a given pest is then calculated by taking into account the combined effects of all other pests. This is done by considering the theoretical effect of one pest on another according to five levels: high facilitation, low facilitation, no effect, low reduction, high reduction.

Then, interactions between pests are taken into account according the level of each pest and a simple typology of interaction between two pests: high facilitation, low facilitation, no interaction, low reduction, high reduction (**Table 6**).

Severity of Pest 2 without any other pest	Theoretical effect of Pest 2 on Pest 1	Actual effect of Pest 2 on Pest 1
Maximum, very high or high	High facilitation	High facilitation
Maximum, very high or high	Low facilitation	Low facilitation
Maximum, very high or high	No effect	No effect
Maximum, very high or high	Low reduction	Low reduction
Maximum, very high or high	High reduction	High reduction
Medium	High and low facilitation	Low facilitation
Medium	No effect	No effect
Medium	High and low reduction	Low reduction
Low or very low	High facilitation	Low facilitation
Low or very low	Low facilitation, no effect, low reduction	No effect
Low or very low	High reduction	Low reduction
Nil	Any	No effect

doi:10.1371/journal.pone.0073202.t001

Tableau 6 : Generic utility function used to represent the effect of one pest on another in IPSIM.

Table 6 is used to calculate the overall effect of all other pests on the considered pest. Then, the number of pests with high facilitation, low facilitation, no effect, low reduction, high reduction is calculated (**Figure 13**) and the overall interactions are calculated according to the utility function presented **Table 7**.

Number of pests with high facilitation	Number of pests with low facilitation	Number of pests with no effect	Number of pests with low reduction	Number of pests with high reduction	Overall effects of all other pests
0	0	0	0	0	No effect
0	0	0	0	≥1	High reduction
0	0	0	≥1	0	Low reduction
0	0	0	≥1	≥1	High reduction
0	0	≠1	0	0	No effect
0	0	≠1	0	≥1	High reduction
0	0	≠1	≥1	0	Low reduction
0	0	≠1	≥1	≥1	High reduction
0	≥1	0	0	0	Low facilitation
0	≥1	0	0	≥1	High reduction
0	≥1	0	≥1	0	Low reduction
0	≥1	0	≥1	≥1	Low reduction
0	≥1	≠1	0	0	Low facilitation
0	≥1	≠1	0	≥1	High reduction
0	≥1	≠1	≥1	0	Low reduction
0	≥1	≠1	≥1	≥1	High reduction
≠1	0	0	0	0	High facilitation
≠1	0	0	0	≥1	Low reduction
≠1	0	0	≠1	0	No effect
≠1	0	0	≠1	≥1	Low reduction
≠1	0	≠1	0	0	High facilitation
≠1	0	≠1	0	≥1	Low reduction
≠1	0	≠1	≥1	0	Low reduction
≠1	0	≠1	≥1	≥1	Low reduction
≠1	≥1	0	0	0	High facilitation
≠1	≥1	0	0	≥1	Low reduction
≠1	≥1	0	≥1	0	Low reduction
≠1	≥1	0	≥1	≥1	High reduction
≠1	≥1	≠1	0	0	High facilitation
≠1	≥1	≠1	0	≥1	Low reduction
≠1	≥1	≠1	≥1	0	No effect
≠1	≥1	≠1	≥1	≥1	Low reduction

doi:10.1371/journal.pone.0073202.t002

Tableau 7 : Generic utility function used to calculate the overall effect on a given pest caused by all the other pests in an IP.

Ultimately, the severity of each pest is calculated using the generic utility function presented in **Table 8** as a function of the severity that would occur without any other pest, and the overall interactions calculated with the utility function presented in **Table 7**.

Severity of the considered pest without any other pests	Overall effect of the other pests	Severity of the considered pest under the influence of other pests
Maximum	High facilitation	Maximum
Maximum	Low facilitation	Maximum
Maximum	No effect	Maximum
Maximum	Low reduction	Very high
Maximum	High reduction	High
Very high	High facilitation	Maximum
Very high	Low facilitation	Maximum
Very high	No effect	Very high
Very high	Low reduction	High
Very high	High reduction	Medium
High	High facilitation	Maximum
High	Low facilitation	Very high
High	No effect	High
High	Low reduction	Medium
High	High reduction	Low
Medium	High facilitation	Very high
Medium	Low facilitation	High
Medium	No effect	Medium
Medium	Low reduction	Low
Medium	High reduction	Very low
Low	High facilitation	High
Low	Low facilitation	Medium
Low	No effect	Low
Low	Low reduction	Very low
Low	High reduction	Very low
Very low	High facilitation	Medium
Very low	Low facilitation	Low
Very low	No effect	Very low
Very low	Low reduction	Very low
Very low	High reduction	Very low
Nil	High facilitation	Nil
Nil	Low facilitation	Nil
Nil	No effect	Nil
Nil	Low reduction	Nil
Nil	High reduction	Nil

doi:10.1371/journal.pone.0073202.t003

Tableau 8 : Generic utility function used to calculate the severity of one pest in interaction with the other pests of an IP.

2.3.2. *Structure of the attributes used to predict the severity of a single pest*

The input attributes of IPSIM describe CP, soil and climate (physical and chemical components of the field which partly define the considered PS), and biological interactions at the territory level (**Figure 12**). **Figure 14** represents the sub-tree used in IPSIM to calculate the severity of a single pest without any interaction with other pests for a given crop. CP are composed of cultural, genetic, biological, physical and chemical control actions. The most detailed level is cultural control. It is composed of actions for the management of primary inoculum (through the interaction between crop sequence and tillage for arable crops and prophylactic measures for perennial crops); escape strategies through the choice of the sowing date (some crops are less susceptible to some pests after or before some phenological stages) and mitigation through crop status (as a function of the sowing rate, fertilisation, irrigation, pruning for perennial crops, and application of crop growth regulators). The genetic control represents the level of resistance of the cultivar (or the cultivar mixture) to the pest concerned. For some pests, biological control can be applied using living organisms released at the field or greenhouse scale. Physical control consists of using any mechanical, thermal, or electromagnetic actions to limit the pest population. Finally, the attribute "Chemical control" describes the efficacy of pesticide treatments and/or use of non-lethal chemicals such as pheromones or repellents. The effect of soil and climate are described independently and later aggregated in a "Soil and climate" attribute. Finally, the effects of elements (e.g. other fields, hedges, forests) at the territory level are taken into account by describing sources of primary inoculum and beneficials at the territory level, as well as the presence of physical barriers that might limit these interactions between the field concerned and its surrounding environment.

The scales and the utility functions used for the attributes presented in Figure 14 cannot be determined in a generic way. They have to be defined according to experimental results, literature, models, or expert knowledge and are specific to the crop concerned.

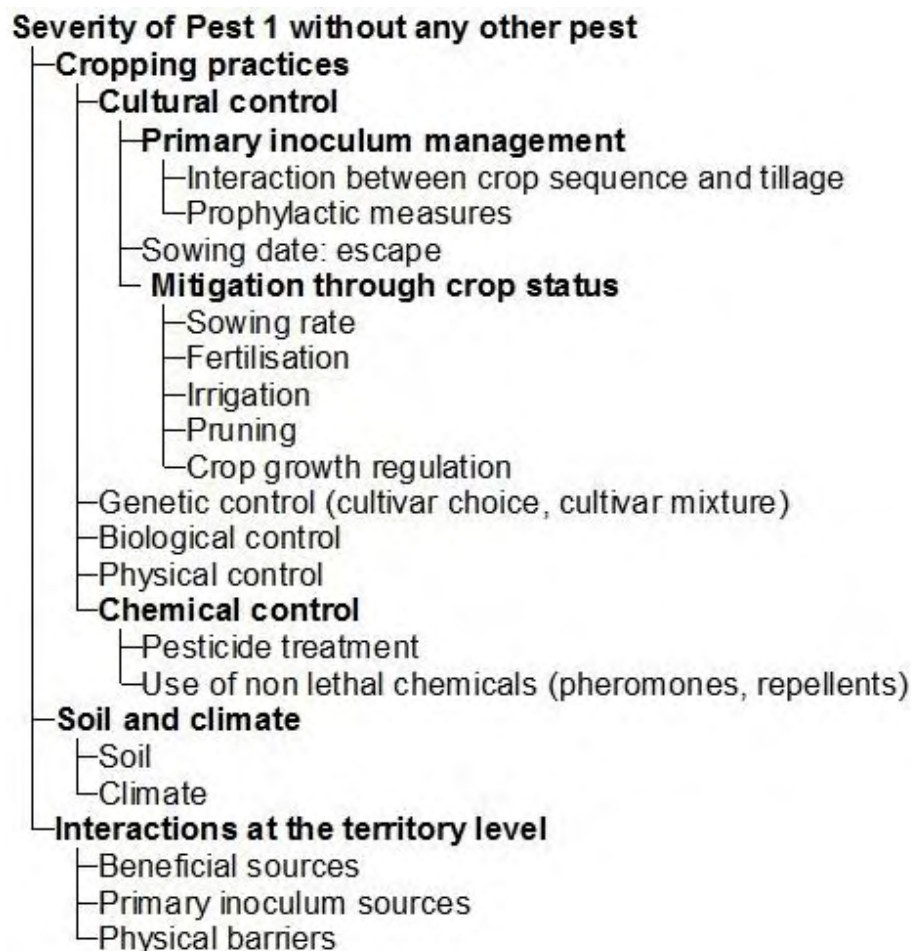


Figure 14 : Hierarchical sub-tree to predict the severity of a single pest without any interaction with other pests (screenshot of the DEXi software).

2.3.3. *Typology of simulated Injury Profiles*

So far, IPSIM was presented as a simulator of the severity levels for single pests interacting in an injury profile (**Figure 13**). This detailed information is valuable to researchers, advisers and even farmers to characterise the agronomic performance of cropping practices in a given production situation with regard to potential losses that various pests may cause. However, IPSIM can provide other information, less precise for the IP description, but more pertinent for the diagnosis of the effects of CP and the biological environment of the considered field on injury dynamics. We chose to categorise pests according to a simple trait that describes their level of dependency to the cropping systems: their level of endocyclism (high and low). The term "endocyclic" refers to an organism whose development is mostly restricted to a

field and highly depends on the field endo-inoculum. The level of endocyclism of a given pest is therefore directly defined by the level of persistence of primary endo-inoculum *sensu lato* in a given field and its low dispersal ability. The inoculum produced by an endocyclic pest in one season can be carried over to the next, thus building up a cumulative inoculum reservoir over the years. Endocyclic organisms are thus highly dependent on field history. The categorisation of pests into two groups (high and low levels of endocyclism) can help identify the main level to address to control them: the field or territory level. For example, root-knot nematodes (*Meloidogyne* spp.) on horticultural crops, wireworms on potato (*Agriotes* spp.), wheat common bunt (*Tilletia* spp.), take-all on wheat (*Gaeumannomyces graminis* var. *tritici*), dicotyledonous Weeds such as *Chenopodium album* and *Fallopia convolvulus* are highly endocyclic pests. Aphids on several crops (e.g. *Brevicoryne brassicae*), powdery mildew on grapevine (*Erysiphe necator*), Rusts on cereals (e.g. *Puccinia recondita*), codling moth on apple tree (*Cydia pomonella*), and Weeds such as some *Asteraceae* (e.g. *Taraxacum dens leonis*) or grassy Weeds (e.g. *Bromus sterilis*) are slightly endocyclic pests. Two utility functions were designed to summarise the distribution of final injury levels of single pests using two aggregated variables: the overall final severity of i) highly and ii) slightly endocyclic pests (**Table 9**). Considering three levels of final injury (low, medium, high) for each of the two endocyclism groups, a range of nine possible generic IP was proposed to describe IP (**Figure 16**) for any agricultural productions worldwide (i.e. major crops; vegetables; vineyard; orchards; horticulture; industrial crops, aromatic and medicinal plants; grassland; in field or in Controlled Environment Agriculture). For PS where IP have high final injury levels of endocyclic pests (IP7, IP8; IP9; **Figure 16**), a better management of primary inoculum production at the field level should be undertaken (e.g. interaction between by crop sequence and tillage; stubble management, volunteer management, stale seedbeds and sanitation measures for perennial crops). For PS with IP with high levels of slightly endocyclic pests (IP3, IP6; IP9; **Figure 16**), special attention should be paid to i) the management of inoculum production at the territory level (e.g. spatial distribution of cropping systems, management of primary inoculum production in the neighbouring fields or waste piles, management of interstitial spaces to promote beneficials); ii) escape strategies (sowing date adaptation); iii) mitigation through the crop status (e.g. cultivar choice, sowing rate, nitrogen fertilisation, irrigation).

Number of slightly endocyclic pests with a very high or maximum final injury level	Number of slightly endocyclic pests with a low, medium or high final injury level	Number of slightly endocyclic pests with a null or very low final injury level	Overall severity of slightly endocyclic pests in the Injury Profile
>1	>1	>1	High
>1	>1	0	High
>1	0	>1	High
>1	0	0	High
0	>1	>1	Medium
0	>1	0	Medium
0	0	>1	Low
0	0	0	Low

The same aggregating table is used to define the level of severity of highly/moderately endocyclic pests.
doi:10.1371/journal.pone.0073202.t004

Tableau 9 : Generic utility function used to define the level of severity of slightly endocyclic pests in an Injury Profile as a function of the final injury level of single pests. The same utility function is used to define the level of severity of highly endocyclic pests.

3. Results

3.1. Implementation of IPSIM generic framework into a simulation model, an example

This article aims to present the whole modelling process: i) development of a conceptual framework; ii) implementation of this conceptual scheme into a simulation model for a simple case; iii) simulation to exemplify potential uses of IPSIM models. The specification of IPSIM will be performed for a simple injury profile on wheat: two highly endocyclic diseases (eyespot and sharp eyespot) and a slightly endocyclic disease (Brown Rust). Eyespot, caused by the necrotrophic and soil-borne fungi *Oculimacula yallundae* and *O. acuformis*, anamorph *Pseudocercospora herpotrichoide* is considered to be the most important stem-base disease of cereals in temperate countries. In France, sharp eyespot, another soil-borne fungus caused by *Rhizoctonia cerealis*, is one of the minor diseases of the foot disease complex of winter wheat, but is thought to interact strongly with eyespot. The two pathogens show distinct antagonistic behaviour within the infected stem base, which translates into a negative correlation between sharp eyespot and eyespot incidence [42-44]. Finally, Brown Rust, caused by *Puccinia triticina*, is the most common Rust disease of wheat and is now recognised as an important pathogen in wheat production worldwide, causing significant yield losses over large geographical areas [45]. As

opposed to the first two soil-borne diseases which are disseminated over short distances, Brown Rust is an obligate, airborne disease with conidia which are wind-dispersed over hundreds of kilometres, resulting in Rust epidemics on a continental scale [46].

The design of IPSIM-Wheat-Eyespot and the evaluation of its predictive quality is described in a companion paper [22]. For the sake of simplicity and readability, the other two models will not be presented in detail, but their development was similar to the one presented in [22]. The two models for eyespot and sharp eyespot are similar in terms of structure (tree) and utility functions because the impact of CP on sharp eyespot is similar to that on eyespot [42]. However, since Brown Rust is an airborne disease, the effects of primary inoculum management at the field scale are less important than for the two soil-borne diseases. For this airborne disease, the main control methods are: i) mitigation through crop status (using a resistant cultivar for instance) and; ii) the management of primary inoculum sources at the territory level. For this schematic IP, we will assume that no direct interactions occur between the two soil-borne, stem-base diseases and this airborne, foliar disease.

3.2. Simulation scenarios

The use of the model presented in section 3.1 is exemplified for three contrasting CP in a given PS (**Figure 15**). The three CP considered were: intensive, integrated and organic systems. The intensive CP is a wheat monoculture with a high level of inputs and a high-yielding cultivar susceptible to diseases, aiming at a high yield level. The integrated system is characterised by a limited use of inputs, with a lower-yielding cultivar than the former system, but less susceptible to diseases, a short wheat rotation, and a satisfactory yield level. The organic system is characterised by low inputs, with a disease-resistant cultivar with a limited yield, associated with a long wheat rotation and appropriate crop management. The three systems were tested in the same PS, with a weather scenario favourable to the development of the considered diseases.

Attribute	Intensive	Integrated	Organic
Injury profile	IP4	IP2	IP1
Injuries caused by highly endocyclic pests	medium	<i>slight</i>	<i>slight</i>
Severity of eyespot	medium	<i>low</i>	<i>low</i>
Incidence of eyespot without any other pest	medium	<i>very low</i>	<i>very low</i>
Cropping practices	moderately favourable	<i>unfavourable</i>	<i>unfavourable</i>
Primary inoculum management	favourable	<i>unfavourable</i>	<i>unfavourable</i>
Previous crop	host	<i>non host</i>	<i>non host</i>
Pre-previous crop	host	host	<i>non host</i>
Tillage after harvest of the previous crop	non-inversion tillage	non-inversion tillage	<i>inversion tillage</i>
Tillage after harvest of the pre-previous crop	non-inversion tillage	<i>inversion tillage</i>	<i>inversion tillage</i>
Sowing date: escape	early sowing	normal sowing date	<i>late sowing</i>
Mitigation through crop status	favourable	moderately favourable	<i>unfavourable</i>
Cultivar choice	very susceptible to susceptible	moderately susceptible	<i>quite to very resistant</i>
Level of N fertilisation	excess level	<i>balanced level</i>	<i>balanced level</i>
Sowing rate	normal	<i>low</i>	high
Chemical control: use of fungicide	<i>one</i>	none	none
Soil and climate	favourable	favourable	favourable
Soil	favourable	favourable	favourable
Climate	favourable	favourable	favourable
Autumn/winter	very favourable	very favourable	very favourable
Spring	favourable	favourable	favourable
Interactions at the territory level	<i>neutral</i>	<i>neutral</i>	<i>neutral</i>
Beneficial sources	high	high	high
Primary inoculum sources	<i>neutral</i>	<i>neutral</i>	<i>neutral</i>
Severity of sharp eyespot	<i>low</i>	<i>low</i>	<i>low</i>
Incidence of Sharp eyespot on wheat	<i>very low</i>	<i>nil</i>	<i>nil</i>
Cropping practices	favourable	<i>unfavourable</i>	<i>unfavourable</i>
Primary inoculum management	very favourable	<i>unfavourable</i>	<i>unfavourable</i>
Previous crop	host	<i>non host</i>	<i>non host</i>
Pre-previous crop	host	host	<i>non host</i>
Tillage after harvest of the previous crop	non-inversion tillage	non-inversion tillage	<i>inversion tillage</i>
Tillage after harvest of the pre-previous crop	non-inversion tillage	<i>inversion tillage</i>	<i>inversion tillage</i>
Sowing date: escape	early sowing	normal sowing date	<i>late sowing</i>
Mitigation through crop status	moderately favourable	<i>unfavourable</i>	moderately favourable
Cultivar choice	susceptible	susceptible	susceptible
Level of N fertilisation	excess level	<i>balanced level</i>	<i>balanced level</i>
Sowing rate	normal	<i>low</i>	high
Soil and climate	favourable	favourable	favourable
Soil	favourable	favourable	favourable
Climate	favourable	favourable	favourable
Autumn/winter	very favourable	very favourable	very favourable
Spring	favourable	favourable	favourable
Interactions at the territory level	<i>neutral</i>	<i>neutral</i>	<i>neutral</i>
Beneficial sources	high	high	high
Primary inoculum sources	<i>neutral</i>	<i>neutral</i>	<i>neutral</i>
Incidence of eyespot without any other pest	medium	medium	<i>very low</i>
Injuries caused by slightly endocyclic pests	<i>slight</i>	medium	<i>slight</i>
Severity of brown rust without any other pest	<i>low</i>	medium	<i>low</i>
Incidence of brown rust	<i>low</i>	<i>very low</i>	<i>low</i>
Cropping practices	unfavourable	Favourable	unfavourable
Chemical control: use of fungicide	<i>one</i>	none	none
Mitigation through crop status	very favourable	favourable	<i>unfavourable</i>
Cultivar choice	very susceptible to susceptible	moderately susceptible	<i>quite to very resistant</i>
Level of N fertilisation	excess level	<i>balanced level</i>	<i>balanced level</i>
Sowing rate	Medium	<i>Low</i>	High
Sowing date: escape	early sowing	normal sowing date	<i>late sowing</i>
Primary inoculum management	favourable	favourable	<i>unfavourable</i>
Previous crop	host	host	<i>non host</i>
Pre-previous crop	host	<i>non host</i>	<i>non host</i>
Tillage after harvest of the previous crop	non-inversion tillage	non-inversion tillage	<i>inversion tillage</i>
Tillage after harvest of the pre-previous crop	non-inversion tillage	<i>inversion tillage</i>	<i>inversion tillage</i>
Soil and climate	favourable	favourable	favourable
Soil	<i>neutral</i>	<i>neutral</i>	<i>neutral</i>
Climate	favourable	favourable	favourable
Autumn/winter	high	favourable	favourable
Spring	high	<i>neutral</i>	<i>neutral</i>
Interactions at the territory level	<i>neutral</i>	<i>neutral</i>	<i>neutral</i>
Beneficial sources	high	high	high
Primary inoculum sources	high	high	neutral

Figure 15 : Example of simulation outputs for wheat obtained for three cropping systems (intensive, integrated and organic) in a given production situation (screenshot of the DEXi software). Three pests in interaction were taken into account in these simulations: eyespot, sharp eyespot and Brown Rust.

3.3. Simulation results

The DEXi software computed the aggregated attribute values of the model presented in section 3.1. In the same PS, the three CP lead to contrasting IP. In the absence of estimates of potential yield losses caused by these injury profiles, it is difficult to

provide direct recommendations for CP adaptations. However, these simulations enable a diagnosis in terms of pest development for the three simulated systems. The intensive system led to IP4, i.e. a medium final injury level for highly endocyclic pests associated with a low final injury level for slightly endocyclic pests (**Figure 16**). For this system, the model suggests that a better management of primary inoculum of the pathogen responsible for eyespot injury should be considered. The integrated system led to IP2, i.e. a low final injury level for highly endocyclic pests associated with a medium final injury level for slightly endocyclic pests (**Figure 16**). For this system, the model suggests that a better control of Brown Rust through the use of a more resistant cultivar or the use of a low-dose fungicide, provided that it would be economically sound. The organic system led to IP1, i.e. a low final injury level for highly endocyclic pests associated with a low final injury level for slightly endocyclic pests (**Figure 16**). This is consistent with the associated CP which aims at minimising pest development by combining prophylactic measures with partial effects. It is important to underline that this diagnosis did not address yield losses, but focused only on injury.

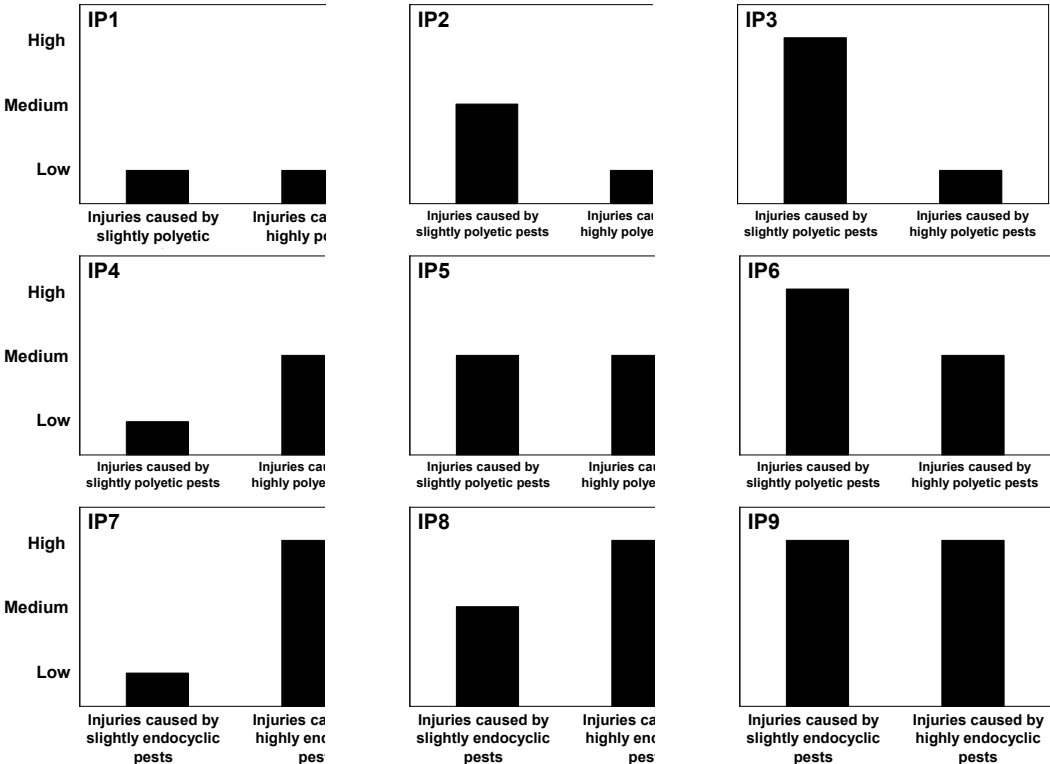


Figure 16 : Typology of injuries caused by multiple pests on a crop for given Cropping Practices in a given Production Situation using nine generic Injury Profiles (IP1-IP9). These Injury Profiles are determined by the final levels of the injuries caused by slightly and highly endocyclic pests (plant pathogens, Weeds and animal pests). They can be used to perform cross-cutting analyses for a wide range of agricultural productions.

4. Discussion

4.1. Potential uses of IPSIM models

These simulations illustrate how IPSIM can be used to assess *ex-ante* the performance of various cropping systems with regard to the control of pest injury on a given crop. This information is useful when designing innovative cropping systems, either by prototyping, e.g. [47], simulation, e.g. [48], or expert knowledge, e.g. [12]. Since climate often has a large effect on the IP, weather frequency analyses are needed, using a set of input variables describing a wide range of climatic scenarios so that the information provided by IPSIM is robust in the face of weather variability. However, IPSIM cannot be seen as a model to design innovative cropping systems *in silico* for two major reasons. First, crop damage is not simulated by IPSIM, which makes it difficult to rank pests with respect to the crop losses they cause. Second, the social, economic and environmental performances of the simulated cropping systems are not calculated. To tackle this problem, IPSIM could be coupled to a damage model (such as RICEPEST [6, 19, 20] or WHEATPEST [20]) that would predict yield losses as a function of the IP encountered and other relevant variables. Alternatively, a crop model (e.g. STICS [14]) could be used, with a set of single damage functions (such as the ones used in WHEATPEST [20]), and coupled with IPSIM. Then, once the damage caused by a given IP in a given PS has been predicted, a more general framework, such as MASC, [30] or DEXiPM, [49], could be used to predict the social, economic and environmental performance of the tested systems in a given PS. This approach will help us to design innovative cropping systems less vulnerable to pests. Using that modelling framework, IPSIM would be the missing link to fill the gap between crop models that can help predict performance of pest-free cropping systems and epidemiological models that generally do not represent the effects of crop status under the influence of CP. In addition, models developed with IPSIM could be used to create typologies of IP at a regional, national, continental or even worldwide scale, using a schematic description of soil and climate, together with a description of the diversity of CP. This should reveal the main IP encountered and help us to design strategies to better control them with better vertical and horizontal integration of IPM. If the corresponding damage models were

available, the typology produced could help us to objectively prioritise research efforts on the main harmful pests.

IPSIM could also be used in an *ex-post* analysis to understand the behaviour of commercial field or experimental plots. Finally, it can be viewed as a communication tool for groups, as well as to teach practitioners and students. Knowledge of several scientific fields involved in crop protection, as well as several types of expertise (of scientists, extension engineers, or farmers) can be built into IPSIM, offering a framework for these various communities to interact and combine their knowledge.

4.2. Limitations of the approach

Like any other model, the predictive quality of IPSIM should be assessed prior to its use. This highlights the urgent need to collect data in commercial fields describing the input variables of IPSIM, *i.e.* CP, IP, soil and weather, along with the social, economic and environmental performance of the monitored agro-ecosystems. It is important to also add measurements of state variables characterising the crop status (e.g. biomass per area unit, Leaf Area Index) in order to better describe important state variables of the agroecosystem for other possible future analyses of the datasets created. However, due to the lack of datasets containing a description of IP, the confidence that users may have in IPSIM models could also be enhanced by comparing simulation outputs with their own expertise to identify any mismatches. All the information contained within IPSIM models is held in the hierarchical trees and the associated utility functions. One of the consequences of this specificity of models developed with the IPSIM framework is that, once developed, the predictive quality of the models can be enhanced easily using experimental datasets by modifying utility functions, and, if need be, the structure of the model.

The possible IP that IPSIM models can simulate are numerous. However, observations tend to show that the diversity of IP encountered in commercial fields is much less than the structure of IPSIM models can generate. This results from two mechanisms. First, pests can interact directly (through facilitation, predation, competition for the same ecological niche) or indirectly (through modification of the biotope). This implies that not all potential theoretical injury levels could occur simultaneously. This is a limitation of IPSIM which does not account for the impact of

injuries on crop growth. Secondly, the soil, climate, CP and landscape occurring in a given territory might not be diverse enough to lead to all theoretical injury levels (for instance, the theoretical IP with all the forms of injury at their maximum level does not exist in reality). Another limitation of IPSIM is the way that interactions between pests are represented. If n pests are considered, $n(n-1)$ interactions are to be described. This is similar to the three-body (or n -body) problem in physics, which has a global analytical solution in the form of convergent power series [50], but that has to be approximated in practice because they converge too slowly. IPSIM models approximate interactions among injuries by arbitrarily calculating the global interaction that would occur between a given injury and the rest of the IP defined as the sum of single injuries simulated without taking into account interactions among pests. However, this approximation certainly appears negligible as compared to other necessary simplification hypotheses.

From the conceptual viewpoint, it could be asked why the crop which is entered in the field biological component (**Figure 12**) does not appear at the first level of the IPSIM tree. After all, pests only experience physical, chemical and biological interactions within agroecosystems and a description of i) the crop status, ii) soil and climate, and iii) the neighbouring environment of the field are indeed the true drivers of pest dynamics. This option was tried when developing IPSIM structure, but led to too complicated a structure, the effect of single cultural operations being overlooked among the numerous levels of the tree. In addition, datasets with a description of CP and IP are extremely scarce. The requirement of additional variables describing the crop status (e.g. in terms of phenology, architecture, biomass, Leaf Area Index) would also lead to greater difficulties in developing IPSIM models and in evaluating its predictive quality.

We recommend to develop models with no more than 7 final injury levels for a single pest. The lack of precision of IPSIM models could be seen as a drawback as compared to quantitative epidemiological models. Firstly this is because these latter models address a much simpler system: a single pest, rather than an IP. Secondly, when developing models of complex systems, accuracy should be sought rather than precision. Searching for better precision would certainly lead to an increase in the model's complexity and possibly to a dead end. We believe that the proposed precision of the models that will be developed with the IPSIM framework is more than

enough for the main ultimate purpose of the model: helping the design of innovative cropping systems less vulnerable to pests.

4.3. Points for reflection

The presented structure of IPSIM is not exhaustive in terms of control methods that can be undertaken. However, developers of models within the IPSIM framework can always easily modify its structure in order to take into account the effects of control measures not present in **Figure 14**. For instance, the effect of cultivar mixtures or intercrops could be implemented, provided that the required knowledge is available.

The main breakthrough of IPSIM is to be able to handle complexity in a simple way. Input variables of the IPSIM models should be simple to provide. Most of these input variables will be static variables, except for weather variables that will be dynamic. The price to pay to handle the level of ecological complexity (such as defined by Li, [51]) addressed by IPSIM is that IPSIM models are static. This is certainly not a problem to predict the consequences of technical options in a given PS, but could hamper the linkage with dynamic models as suggested earlier. This limitation could easily be overcome by associating the level of final injury predicted by IPSIM models with generic dynamics. In order to do so, exponential, monomolecular, logistic [52], Gompertz, or Richards models [53] could be used with generic parameters chosen to represent the qualitative ordinal different injury levels predicted by IPSIM models.

The choice of qualitative variables to describe agroecosystems is relevant for several reasons. Firstly, farmers generally rely on a qualitative perception of their environment to make decisions. This suits the formalism of IPSIM. Secondly, because of the complexity of the system, few datasets are available to describe its components, i.e. the PS, CP and IP. Using qualitative variables enables one to gather and improve various existing datasets which were not acquired for the development of IPSIM models. For instance, datasets from diagnoses of commercial fields or even from experiments may not have used the same severity scale for a given disease. The use of qualitative classes allows data from different origins and/or with different precision to be combined. It is possible to associate interval classes with qualitative attributes. For instance, the 7 levels "nil"; "very low"; "low"; "medium"; "high"; "very high"; and "maximum" can be transformed into [0]; [0-20]; [20-40]; [40-60]; [60-80]; [80-100]; [100] intervals of percentage of diseased foliage respectively, if

one wants to compare these outputs with observed severities of a disease for instance. Thus, data acquired on various scales can still be combined to strengthen the dataset used to estimate the predictive quality of the model or to improve the utility functions.

Table 10 presents the equivalence between features of models developed within the IPSIM framework and more common quantitative simulation models. Input attributes of IPSIM models can be nominal, ordinal or interval variables, unlike quantitative simulation models, which require only interval input variables.

Feature	Qualitative simulation models such as the ones developed with the IPSIM framework	Quantitative simulation models
Type of input variables	Nominal, ordinal, or interval	Interval
Type of state variables	Ordinal	Interval
Type of output variables	Ordinal (can be transformed into static interval or even dynamic interval)	Interval
Model structure	Aggregation tree	Equations
Specification of the model structure	Aggregating tables	Parameters
Analysis of model's behaviour	Table of local and global weights for each input and aggregated attributes	Sensitivity analyses to input variables and parameters
Measures of agreement (non exhaustive)	Proportion of correctly predicted ordinal classes; non parametric Wilcoxon signed rank test to analyse if the distribution of errors is significantly biased or not; matched marginal distribution analysis or joint distribution analysis in a square contingency table	Bias; Mean Absolute Error; Root Mean Squared Error; Efficiency

doi:10.1371/journal.pone.0073202.t005

Tableau 10 : Equivalence between features of qualitative models developed within the IPSIM framework and quantitative simulation models.

The state variables (aggregated attributes) of IPSIM models, including which output variables, are ordinal. However, if need be, output variables of IPSIM models can be transformed into interval variables. This transformation can be performed by associating each possible ordinal value with a quantitative value (e.g. static final value of an injury level, or quantitative intervals) or with an injury dynamic. The relationship between variables is described by a tree in aggregative qualitative models, whereas quantitative models use equations. The DEXi software [40] provides a table with the respective weights of input and aggregated attributes on the value of the root node (main output). This table can be seen as an equivalent to a sensitivity analysis to input variables for quantitative models. It is notable that IPSIM models have no parameters. The equivalents of parameters which specify

relationships among variables in quantitative models are the utility functions. The proportion of situations correctly simulated is a criterion that can be used to characterise the agreement between values simulated with an IPSIM model and observations. In addition, a non-parametric Wilcoxon signed rank test can be used to analyse whether the distribution of errors is significantly biased or not. This is equivalent to the calculation of the bias (average difference between observed and simulated values) for quantitative models. The non-parametric Pearson's chi-squared test for ordinal variables is recommended to characterise the overall agreement of IPSIM models with observations, as an equivalent to common statistical criteria for quantitative models (Mean Absolute Error; Root Mean Square Error; Efficiency [54]).

The qualitative attributes of IPSIM models can lead to threshold effects. In order to cope with this limitation, a tool, named proDEX was developed to model uncertain expert knowledge [55]. This software offers the definition of probabilistic utility functions, where each combination of descendants' values maps to a probability distribution of the aggregated attributes, rather than a single value. In this approach, input values must be categorised prior to their use in the models. Since this process is time-consuming, proDEX allows categorisations to be part of the model definition and the inputs to be entered as interval variables. In combination with probabilistic utility functions, categorisations can be made to transform numerical values into probabilistic distributions, eliminating the problem of crisp interval boundaries [53]. Eventually, the proDEX method could permit a useful extension of the modelling approach presented in this paper.

Finally, a website giving online access to all the functionalities of IPSIM is planned. This website will enable researchers, advisors, farmers and students to develop their own models for a wide range of crops.

5. Conclusion

We believe that IPSIM is a useful innovative modelling framework to help vertical and horizontal integrations for IPM. Its output attributes include nine generic IP that are based on a two-level categorisation of the degree of endocyclism of harmful organisms. These nine injury profiles can be seen as a tool to perform cross-cutting typologies of agroecosystems for various types of crop (arable crops, vegetables, orchards, vineyards, Controlled Environment Agriculture), with regard to the main

pests that have to be managed. IPSIM will generate new knowledge by combining various sources of information from experiments, diagnoses of commercial field, models, and expert panels in a simple way, despite the high ecological complexity of the system addressed. The associated companion paper provides a proof of concept of the proposed method for a single pest.

References

1. Fess TL, Kotcon JB, Benedito VA (2011) Crop breeding for low input agriculture: a sustainable response to feed a growing world population. *Sustainability* 3: 1742-1772.
2. Kropff MJ, Bouma J, Jones JW (2001) Systems approaches for the design of sustainable agro-ecosystems. *Agricultural Systems* 70: 369-393.
3. Kropff MJ, Teng PS, Rabbinge R (1995) The challenge of linking pest and crop models. *Agricultural Systems* 49: 413-434.
4. Birch ANE, Begg GS, Squire GR (2011) How agro-ecological research helps to address food security issues under new IPM and pesticide reduction policies for global crop production systems. *Journal of Experimental Botany* 62: 3251-3261.
5. Ferron P, Deguine JP (2005) Crop protection, biological control, habitat management and integrated farming. A review. *Agronomy for Sustainable Development* 25: 17-24.
6. Savary S, Willocquet L, Elazegui FA, Teng PS, Pham Van D, et al. (2000) Rice pest constraints in tropical Asia: characterization of injury profiles in relation to production situations. *Plant Disease* 84: 341-337.
7. Zadoks JC (1993) Modern crop protection: developments and perspectives; Zadoks JC, editor. Wageningen Netherlands: Wageningen Pers. ix + 309 p.
8. Jeger MJ (2000) Bottlenecks in IPM. *Crop Protection* 19: 787-792.
9. Zadoks JC (1984) A quarter century of disease warning, 1958-1983. *Plant Disease* 68: 352-355.
10. Daamen RA, Wijnands FG, Vliet Gvd (1989) Epidemics of diseases and pests of winter wheat at different levels of agrochemical input. A study on the possibilities for designing an integrated cropping system. *Journal of Phytopathology* 125: 305-319.
11. Breman H, de Wit CT (1983) Rangeland Productivity and Exploitation in the Sahel. *Science* 221: 1341-1347.
12. Debaeke P, Munier-Jolain N, Bertrand M, Guichard L, Nolot JM, et al. (2009) Iterative design and evaluation of rule-based cropping systems: methodology and case studies. A review. *Agronomy for Sustainable Development* 29: 73-86.
13. Stockle CO, Martin SA, Campbell GS (1994) CropSyst, a cropping systems simulation model: water/nitrogen budgets and crop yield. *Agricultural Systems* 46: 335-359.
14. Brisson N, Mary B, Ripoche D, Jeuffroy MH, Ruget F, et al. (1998) STICS: a generic model for the simulation of crops and their water and nitrogen balances. I. Theory and parameterization applied to wheat and corn. *Agronomie* 18: 311-346.
15. Aubertot JN, Salam MU, Diggie AJ, Dakowska S, Jedryczka M (2006) SimMat, a new dynamic module of Blackleg Sporocle for the prediction of pseudothecial maturation of *L. maculans*/*L. biglobosa* species complex. Parameterisation and evaluation under Polish conditions. In: Koopmann B, Cook S, Evans N, Ulber B, editors. *Bulletin OILB/SROP*. pp. 277-285.
16. Bergez JE, Colbach N, Crespo O, Garcia F, Jeuffroy MH, et al. (2010) Designing crop management systems by simulation. *European Journal of Agronomy* 32: 3-9.

17. Rabbinge R, Rijdsdijk FH (1983) EIPRE: a disease and pest management system for winter wheat, taking account of micrometeorological factors. *Bulletin, OEPP* 13: 297-305.
18. Zadoks JC (1988) EIPRE: research, development and application of an integrated pest and disease management system for wheat. *Bulletin SROP*. pp. 82-90.
19. Willocquet L, Savary S, Fernandez L, Elazegui FA, Castilla N, et al. (2002) Structure and validation of RICEPEST, a production situation-driven, crop growth model simulating rice yield response to multiple pest injuries for tropical Asia. *Ecological Modelling* 153: 247-268.
20. Willocquet L, Aubertot JN, Lebard S, Robert C, Lannou C, et al. (2008) Simulating multiple pest damage in varying winter wheat production situations. *Field Crops Research* 107: 12-28.
21. Savary S, Mille B, Rolland B, Lucas P (2006) Patterns and management of crop multiple pathosystems. *European Journal of Plant Pathology* 115: 123-138.
22. Robin MH, Colbach N, Lucas P, Monfort F, Cholez C, Debaeke P, Aubertot JN (submitted) Injury Profile SIMulator, a hierarchical aggregative modelling framework to predict an injury profile as a function of cropping practices, soil, climate and field environment. II. Proof of concept: design and evaluation of IPSIM-Wheat-Eyespot, a model that predicts eyespot injuries on winter wheat.
23. Sebillotte M (1990) Systèmes de culture, un concept opératoire pour les agronomes, L. Combe, D. Picard, Editors, *Les Systèmes de Culture*, INRA, Paris (1990), pp. 165–196.
24. Meynard JM, Dore T, Lucas P (2003) Agronomic approach: cropping systems and plant diseases. *Comptes Rendus Biologies* 326: 37-46.
25. Oblak L, Novak B, Lipuscek I, Kropivsek J (2007) Launching work orders into production of wood enterprise with the multi-criteria decision-making method. *Zbornik Gozdarstva in Lesarstva*: 33-39.
26. Rozman C, Pazek K, Bavec F, Bavec M, Turk J, et al. (2006) A multi-criteria analysis of spelt food processing alternatives on small organic farms. *Journal of Sustainable Agriculture* 28: 159-179.
27. Griffiths BS, Ball BC, Daniell TJ, Hallett PD, Neilson R, et al. (2010) Integrating soil quality changes to arable agricultural systems following organic matter addition, or adoption of a ley-arable rotation. *Applied Soil Ecology* 46: 43-53.
28. Rozman C, Potocnik M, Pazek K, Borec A, Majkovic D, et al. (2009) A multi-criteria assessment of tourist farm service quality. *Tourism Management* 30: 629-637.
29. Ars MS, Bohanec M (2010) Towards the ecotourism: a decision support model for the assessment of sustainability of mountain huts in the Alps. *Journal of Environmental Management* 91: 2554-2564.
30. Sadok W, Angevin F, Bergez JE, Bockstaller C, Colomb B, et al. (2009) MASC, a qualitative multi-attribute decision model for ex ante assessment of the sustainability of cropping systems. *Agronomy for Sustainable Development* 29: 447-461.
31. Pelzer E, Fortino G, Bockstaller C, Angevin F, Lamine C, et al. (2012) Assessing innovative cropping systems with DEXiPM, a qualitative multi-criteria assessment tool derived from DEXi. *Ecological Indicators* 18: 171-182.
32. Pazek K, Rozman C, Bavec F, Borec A, Bavec M (2010) A multi-criteria decision analysis framework tool for the selection of farm business models on organic mountain farms. *Journal of Sustainable Agriculture* 34: 778-799.

33. Pazek K, Rozman C (2007) The decision support system for supplementary activities on organic farms. *Agricultura (Slovenia)* 5: 15-20.
34. Bohanec M, Messean A, Scatista S, Angevin F, Griffiths B, et al. (2008) A qualitative multi-attribute model for economic and ecological assessment of genetically modified crops. *Ecological Modelling* 215: 247-261.
35. Pazek K, Rozman C, Irgolic A, Turk J (2012) Multicriteria decision model for evaluating less-favoured areas for agricultural production. 47th Croatian and 7th International Symposium on Agriculture, Opatija, Croatia, 13-17 February 2012 Proceedings: 222-226.
36. Vindis P, Stajnko D, Berk P, Lakota M (2012) Evaluation of energy crops for biogas production with a combination of simulation modeling and DEX-i multicriteria method. *Polish Journal of Environmental Studies* 21: 763-770.
37. Pazek K, Rozman C, Pavlovic V, Cerenak A, Pavlovic M (2009) The multi-criteria decision model aid for assessment of the hop cultivars (*Humulus lupulus* L.). In: Florijancic T, Lusaic R, editors. *Zbornik Radova 44 Hrvatski i 4 Medunarodni Simpozij Agronoma*, Opatija, Hrvatska, 16-20 Veljace 2009. Osijeku, Hrvatska: Poljoprivredni Fakultet Sveucilista Josipa Jurja Strossmayera u Osijeku. pp. 360-364.
38. Pazek K, Rozman C, Cejvanovic F, Par V, Borec A, et al. (2005) Multi attribute decision model for orchard renewal - case study in Bosnia and Herzegovina. *Agricultura (Slovenia)* 3: 13-20.
39. Tchamitchian M, Collange B, Navarrete M, Peyre G (2011) Multicriteria evaluation of the pathological resilience of soil-based protected cropping systems. In: Dorais M, editor. *Acta Horticulturae*. Leuven, Belgium: International Society for Horticultural Science (ISHS). pp. 1239-1246.
40. Bohanec B (2003) Decision support, in: Mladeniaë D., Lavraè N., Bohanec M., Moyle (Eds.), *Data mining and decision support: Integration and collaboration*, Kluwer Academic Publishers, pp. 23–35.
41. Delmotte S, Gary C, Ripoche A, Barbier JM, Wery J. Contextualization of on farm ex-ante evaluation of the sustainability of innovative cropping systems in viticulture, using a multiple criteria assessment tool (DEXi); 2009. Wageningen University and Research Centre. pp. 180-181.
42. Colbach N, Lucas P, Cavelier N, Cavelier A (1997) Influence of cropping system on sharp eyespot in winter wheat. *Crop Protection* 16: 415-422.
43. Reinecke P, Fehrmann H (1979) *Rhizoctonia cerealis* van der Hoeven on cereals in the Federal Republic of Germany
Rhizoctonia cerealis van der Hoeven an Getreide in der Bundesrepublik Deutschland. *Zeitschrift fur Pflanzenkrankheiten und Pflanzenschutz* 86: 190-204.
44. Cavelier N, Lucas P, Boulch G (1985) Evolution of the parasite complex *Rhizoctonia cerealis* Van der Hoeven and *Pseudocercospora herpotrichoides* (Fron) Deighton, fungi attacking the stem base of cereals. *Agronomie* 5: 693-700.
45. Kolmer JA (2005) Tracking wheat rust on a continental scale. *Current Opinion in Plant Biology* 8: 441-449.
46. Bolton MD, Kolmer JA, Garvin DF (2008) Wheat leaf rust caused by *Puccinia triticina*. *Molecular Plant Pathology* 9: 563-575.
47. Lancon J, Wery J, Rapidel B, Angokaye M, Gerardeaux E, et al. (2007) An improved methodology for integrated crop management systems. *Agronomy for Sustainable Development* 27: 101-110.

48. Ould-Sidi MM, Lescourret F (2011) Model-based design of integrated production systems: a review. *Agronomy for Sustainable Development* 31: 571-588.
49. Pelzer E, Fortino G, Bockstaller C, Angevin F, Lamine C, et al. (2012) Assessing innovative cropping systems with DEXiPM, a qualitative multi-criteria assessment tool derived from DEXi. *Ecological Indicators* 18: 171-182.
50. Sundman V (1973) Description and comparison of microbial populations in ecological studies with the aid of factor analysis. "Modern Methods in the Study of Microbial Ecology" *Bulletins from the Ecological Research Committee, Sweden* 17: 135-140.
51. Li BL (2004) *Ecological complexity: an international journal on biocomplexity in the environment and theoretical ecology*. *Ecological Complexity* 1: v + 100 pp.
52. Carpani M, Bergez JE, Monod H (2012) Sensitivity analysis of a hierarchical qualitative model for sustainability assessment of cropping systems. *Journal Environmental Modelling & Software* 27-28: 15-22.
53. Madden LV (2006) Botanical epidemiology: some key advances and its continuing role in disease management. *European Journal of Plant Pathology* 115: 3-23.
54. Wallach D (2011) Crop model calibration: a statistical perspective. *Agronomy Journal* 103: 1144-1151.
55. Žnidaršič M, Bohanec M, Zupan B (2006) proDEX – A DSS tool for environmental decision-making. *Environmental Modelling & Software* 21: 1514-1516.

Troisième partie. Applications d'IPSIM pour le blé d'hiver, IPSIM-Wheat

IPSIM est un outil générique permettant le développement de modèles représentant les profils de dégâts d'une culture donnée en fonction du système de culture, du pédoclimat et de l'environnement de la parcelle (Aubertot et Robin, 2013).

Comme évoqué dans la partie précédente, la culture retenue pour l'application de la démarche IPSIM est le blé d'hiver.

Par ce fait, une preuve de concept relative à l'outil IPSIM a été conduite pour une maladie grave du blé et encore largement traitée chimiquement, le piétin-verse. Cela a contribué au développement du modèle IPSIM-Wheat-Eyespot qui sera présenté dans le premier chapitre de cette partie. Ce modèle constitue également un module du modèle complet à construire IPSIM-Wheat. IPSIM-Wheat-Eyespot a été construit grâce au logiciel DEXi en respectant la démarche de modélisation IPSIM afin de représenter l'incidence finale du piétin-verse en fonction des pratiques culturales et d'éléments décrivant la situation de production.

L'application a été poursuivie pour d'autres bioagresseurs et a permis d'aboutir à la construction de plusieurs modèles pour cinq maladies, un ravageur et les adventices. La qualité prédictive de l'un de ces modèles, IPSIM-Wheat-Brown Rust, a été évaluée pour une maladie foliaire préoccupante et encore essentiellement contrôlée chimiquement : la rouille brune (*Puccinia triticina*). Le développement de ce modèle (conception et évaluation) sera présenté dans le Chapitre 2 de cette partie. Il fait l'objet d'un article actuellement en cours de soumission.

Le Chapitre 3 décrira cinq autres modèles, actuellement en cours de construction/évaluation.

Enfin, un dernier chapitre fera la synthèse de la construction de ces différents modèles en proposant une première version du modèle IPSIM-Wheat.

Chapitre 1. Injury Profile SIMulator, a hierarchical aggregative modelling framework to predict an injury profile as a function of cropping practices, and biotic and abiotic environment. Proof of concept: design and evaluation of IPSIM-Wheat-Eyespot, a model that predicts eyespot injuries on winter Wheat.

Marie-Hélène Robin^{1, 4}, Nathalie Colbach², Philippe Lucas³, Françoise Monfort³, Célia Cholez^{4, 5}, Philippe Debaeke^{4, 5}, Jean-Noël Aubertot^{4, 5}

Published online in PLoS ONE October 2013, Volume 8, Issue 10, e75829;

(Annexe 6).

¹ Université Toulouse, INPT El Purpan, F-31076 Toulouse, France

², INRA, UMR1347 Agroécologie, EcoIDur, F-21000 Dijon

³, INRA, UMR BiO3P, BP 35327, F-35653 Le Rheu, France

⁴ INRA, UMR 1248 AGIR, F-31320 Castanet-Tolosan, France

⁵ Université Toulouse, INPT, UMR AGIR, F-31029 Toulouse, France

1. Introduction

Stem base diseases on cereals and grasses are widespread in many eco-regions of the world and cause important production and economic losses. The most detrimental foot and root pathogens on cereals in temperate areas are *Pseudocercospora herpotrichoides*; *Fusarium* spp, *Rhizoctonia cerealis* and *Gaeumannomyces graminis* [1]. Eyespot caused by the necrotrophic and soil-borne fungi *Oculimacula yallundae* and *O. acuformis*, anamorph *Pseudocercospora herpotrichoides* [2-4] is considered to be the most important stem base disease of cereals in temperate countries [5]. Under cool and wet conditions in autumn and spring, both species sporulate and infect the stem bases of their hosts. Without any host crops (cereals, ryegrass), the pathogen survives on previously infected stubble, on which splash-dispersed conidia and air-dispersed ascospores are produced [6]. Injuries interfere with the circulation of nutrients and water through the base of the stem [7] leading to a weakening and possibly to a breakage of the stem base, causing lodging before harvest [5, 8]. Relative yield losses of up to 50% have been reported for the most severe attacks on winter wheat with lodging [2, 7, 9-11].

In the past, the control of eyespot has relied largely on chemical protection [12]. However, due to the development of resistance to the main available fungicides in *O. yallundae* and *O. acuformis* populations, adaptation of the entire cropping system to control eyespot on wheat is a sound alternative [13, 14]. Furthermore, growing concerns about the impact of pesticides on the environment and human health has led to attempts to limit pesticide use [15, 16]. Most governments of developed countries have launched national action plans to reduce pesticide use. For instance, the French government has set as a goal to reduce pesticide use by 50% by 2018 if possible [17]. The European Union has proposed to encourage the use of low-pesticide farming as one of its priorities by the Sustainable Use Directive (SUD) (<http://eurlex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=OJ:L:2009:309:0071:0086:FR:PDF>).

In addition, the USA decided to support and develop Integrated Pest Management (IPM) nationwide in order to reduce pesticide use [18]. It appears necessary therefore to combine various methods (cultural, genetic and chemical) in IPM strategies [19] to control eyespot on wheat. The main cultural practices that can partly control eyespot

through a specific adaptation are: a low host frequency in the crop sequence, infected stubble management through adapted tillage, a late sowing date and low sowing rate [10, 20, 29] The genetic control of eyespot consists of using resistant cultivars. There are several known sources of resistance to eyespot, but only three resistance genes have been described so far [21-23].

IPM strategies, based on these control methods, have to be developed, adapted and applied to a wide range of physical, chemical, biological and socio-economic contexts. However, it is extremely difficult to describe the entirety of the Cropping Practices (CP)*environment*crop*pest system because of the tremendous number of interactions [24]. Modelling is certainly the best way to handle such a level of complexity and to help design sustainable innovative cropping systems less reliant on pesticides.

However, crop models do not deal with injuries caused by pests [25] and few pest models integrate the effects of cultural practices because of the difficulty of describing their numerous consequences on the agro-ecosystem [26] Thus, different models have been developed to represent eyespot injuries on wheat [27-29] or the associated damage [30] Among these, only one model takes into account the effect of the cropping system (crop succession, soil tillage, sowing date, sowing rate, total nitrogen fertiliser and its form) on injuries caused by eyespot [29]. However, this model does not take into account soil and climate, along with some cultural practices that can greatly influence the disease development (e.g. cultivar choice). There is therefore a need for a model that predicts as exhaustively as possible the effect of CP on eyespot on wheat in a given production situation.

In this article, we will define the Production Situation (PS) as the physical, chemical and biological components, except for pests, of a given field (or agro-ecosystem), its environment, as well as socio-economic drivers that affect farmers' decisions (adapted from [31, 32]). In this definition, "environment" includes the fraction of the territory that can influence pest dynamics through dispersal of harmful or beneficial organisms. In a given PS, a farmer can design several cropping systems according to his goals, his perception of the socio-economic context and his environment, farm features, and his cognition. However, it is assumed that a given cropping system in a given PS, such as defined above, should lead to a unique injury profile. In IPSIM, PS are partly described by three components: soil, climate, and the biological

environment of the field [33]. In the approach used here, the farmer's decision-making process and socio-economic drivers are not taken into account.

The conceptual bases of IPSIM have been described in detail by Aubertot and Robin [33]. The generic hierarchical aggregative modelling framework of IPSIM aims at predicting an injury profile as a function of CP, soil, and climate and the biological field environment for any mono-specific crop production (arable crop, perennial or protected crops). In order to test whether this modelling approach could be successfully applied to represent injuries caused by a single pest, a model, named IPSIM-Wheat-Eyespot, has been developed according to the conceptual framework of IPSIM. It aims at predicting the final incidence of eyespot on wheat as a function of the PS and CP. IPSIM-Wheat-Eyespot gathers available knowledge in the scientific literature (models, experimental results) and expertise and will help design cropping systems with low risk of eyespot on wheat and perform diagnoses of commercial wheat fields. IPSIM-Wheat-Eyespot will be used as a sub-model for IPSIM-Wheat, a model that will predict the injury profile on winter wheat (i.e. the distribution of injuries caused by the most important detrimental pests on wheat [33]). This paper presents the method used to develop IPSIM-Wheat-Eyespot using the conceptual modelling framework of IPSIM [33], an evaluation of its predictive quality and a discussion on the limitations and benefits of the model.

2. Materials and Methods

2.1. Design of IPSIM-Wheat-Eyespot

2.1.1. General Approach

IPSIM-Wheat-Eyespot is based on the DEX method, and is implemented with the software DEXi [34]. DEX is a method for qualitative hierarchical multi-attribute decision modelling and support, based on a breakdown of a complex decision problem into smaller and less complex sub-problems, characterised by indicators (or attributes) that are organised hierarchically into a decision tree. These attributes are characterised by their name, a description and a scale. DEXi is generally used to evaluate and analyse decision problems, e.g. [35]. However, the DEX method has

been used here in an original way to model complex agro-ecosystems. IPSIM-Wheat-Eyespot is therefore a hierarchical and qualitative multi-criteria model, allowing the prediction of eyespot injury according to various factors with sometimes opposite effects. IPSIM-Wheat-Eyespot has the following features (derived from [36]):

- i) Processes are hierarchically organised into a tree of attributes that constitutes the structure of the model;
- ii) Terminal attributes of the tree (i.e. leaves or *basic attributes*) are input variables of the model and must be specified by users; the "trunk" of the tree (i.e. the final aggregated attribute) is the main model output variable (final eyespot incidence on wheat); internal nodes are called *aggregated attributes*;
- iii) All model attributes are qualitative variables (nominal or ordinal) rather than quantitative variables. They take only discrete symbolic values, usually represented by words rather than numbers: e.g. "ploughing, stubble disking, rotary harrowing" for nominal variables, "low, medium, high" for ordinal variables;
- iv) The aggregation of values up the tree is defined by utility functions for each aggregated attribute based on "if-then" decision rules. These utility functions can be seen as equivalents of parameters for quantitative numerical models, whereas the tree of attributes can be viewed as the equivalent of their mathematical structure.

IPSIM-Wheat-Eyespot was designed in 3 steps [36]: (1) identification and organisation of the attributes, (2) definition of attribute scales, and (3) definition of utility functions.

2.1.2. Identification and Organisation of Attributes

IPSIM-Wheat-Eyespot aims at predicting the incidence of eyespot on wheat in a given field according to a set of input variables. The spatial scale addressed is the field and the temporal scale is the wheat growing season, although some input variables encompass the crop sequence (up to the pre-preceding crop). IPSIM-Wheat-Eyespot is a static deterministic model.

The hierarchical structure presented in **Figure 17** represents the breakdown of factors affecting eyespot final incidence into specific explanatory variables, represented by lower-level attributes. This figure represents the adaptation to eyespot of the model structure presented in **Figure 13** by Aubertot and Robin [33].

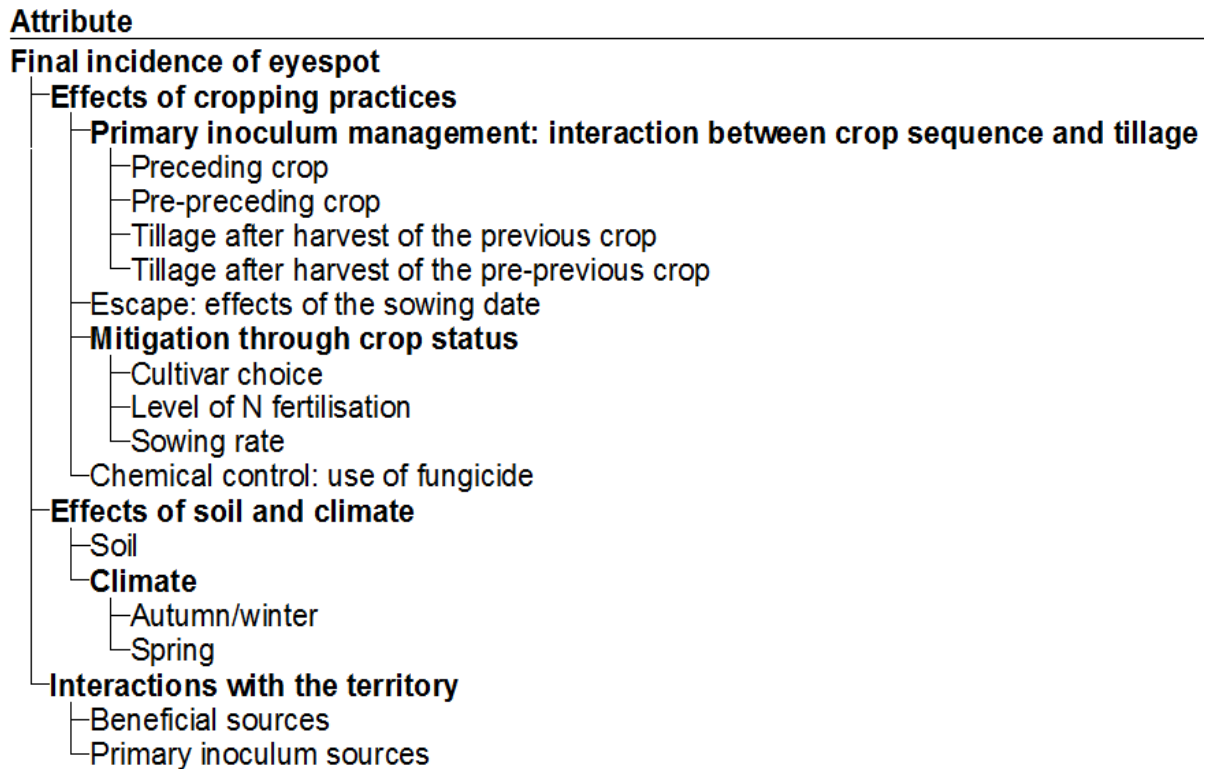


Figure 17 : Hierarchical structure of IPSIM-Wheat-Eyespot (screenshot of the DEXi software). Bolded and non-bold terms represent aggregated and basic attributes, respectively.

In all, IPSIM-Wheat-Eyespot has 19 attributes, of which 14 are basic (i.e. input variables) and 7 aggregated. The 11 basic attributes are presented as the terminal leaves of the tree and their levels are aggregated into higher levels according to utility functions. They represent input variables of the model. The aggregated attributes are internal nodes. They represent state variables or the output variable of IPSIM-Wheat-Eyespot. They are determined by lower-level basic attributes [37]. The output of IPSIM-Wheat-Eyespot is represented by the attribute “Final eyespot incidence” (eyespot incidence at the "milky grain", stage 7: development of fruit on BBCH scale [62]) which is determined by three main factors: CP, soil and climate and the biological environment of the field concerned. This is reflected by the hierarchical

structure of the model, which consists of three sub-trees of attributes (**Figure 17**) split into one main part and two smaller ones. The main sub-tree "Effect of cropping practices" illustrates the complexity of the effects of CP and the need to consider a combination of practices in order to evaluate the final eyespot incidence. It uses indicators based on tactical (with a short time-frame) or strategic decisions (with a longer time-frame [38]). These decisions can affect the agro-ecosystem at several stages.

- i) Eyespot is considered as a highly endocyclic disease (as defined in [33]). Upstream, some CPs affect the quantity of the endo-inoculum (initial pathogen population present in the field). Crop sequence and tillage determine the vertical distribution of infected stubble and have proven to be of major importance for eyespot control [39-43]. Nevertheless, the effects of tillage on the disease are controversial in the literature. According to several authors [1, 39, 44-48], minimum tillage is highly favourable to eyespot development in the presence of preceding host-crop residues in the top layer, whereas ploughing significantly reduces its incidence by burying host-crop residues. These results conflict with those which show that eyespot was more severe after soil inversion than after non-inversion under moist, cool conditions [42-45, 49-53]. The possible explanation of this apparent contradiction is that non-inversion is more favourable to antagonistic micro-organisms than ploughing (the microbiological activity is higher at the soil surface than in the top 20 cm soil layer and the weather in some experiments, such as those in Italy, was probably too dry for antagonistic biota to flourish on crop debris and thus to control eyespot [1]).
- ii) Action by escape consists of shifting periods of highest crop susceptibility away from the main periods of pathogen contamination. This is achieved by altering the wheat sowing date. In the case of eyespot, "escape strategies" cannot really be considered. However, early sowing increases the probability of autumn contamination through primary infection, due to the longer time available for eyespot to develop and to affect stems [40].
- iii) During the crop cycle, some CPs can mitigate infection through crop status by increasing crop competitiveness and/or by creating less favourable conditions for pest development. Low plant density can limit pathogen

development through several mechanisms, such as restricting the contact between plant organs and infectious propagules and lowering the humidity within the canopy. This results in a control of soil-borne diseases like eyespot by low plant density and/or a high shoot number per plant [20]. In addition, low densities increase distances between plants, which limits secondary pathogen cycles, and leads to a drier microclimate. Excessive use of nitrogen fertilisers produces lush crops and favours eyespot through direct and indirect effects [54, 55]. However, in the case of eyespot, nitrogen availability in the soil seems to be a minor factor for the development of the disease [10, 20, 29].

Use of disease-resistant cultivars provides an economic, environmentally-friendly and effective strategy to control disease. However, not all resistant cultivars have been assessed in integrated cropping systems [56] and cultivars do not share the same susceptibilities to different diseases [57]. Eyespot resistance is generally not complete and its expression depends widely on environmental factors [22].

iv) Lastly, a fall-back solution (use of fungicide) can be used when alternative practices are not sufficient. However, several studies have provided evidence for reduced susceptibility to fungicides in populations of *O. yallundae* and *O. acuformis* [58]. For the sake of simplicity, resistance to fungicide in pathogen populations was not taken into account in IPSIM-Wheat-Eyespot.

The two other sub-trees describe the biological environment of the field concerned, as well as soil and climate. These sub-trees are not affected by CP. Among these factors, climate is the main factor affecting eyespot development [9, 41].

2.1.3. *Definition of the Attribute Scales*

The second step in the design of a DEXi model is the choice of ordinal or nominal scales for basic and aggregated indicators. Sets of discrete values were defined for all attributes of the model and described by symbolic value scales defined by words. These values were defined according to the knowledge available in the international literature and some expertise when needed. IPSIM-Wheat-Eyespot uses at most a three-grade value scale (i.e. "Unfavourable", "Favourable", "Very favourable") for the aggregated and basic attributes. This scale refers to the disease. The value

"Favourable" means that the attribute is favourable to the development of the disease and therefore potentially detrimental to the crop.

Some values for basic indicators can be specified using quantitative values which are then translated into qualitative values. For instance, the translation into qualitative values of the sowing date, sowing density or N rate is performed using experimental references or expertise. This translation takes into account the regional context. For example, a sowing date classified as "Early" in the south of France might be classified as "Normal" in northern France. This classification actually depends on the sowing date distribution in the region concerned.

Other attributes are directly qualitatively estimated. For instance, the indicators "inversion tillage or non-inversion tillage" or "preceding and pre-preceding crop" are nominal variables and directly monitored as such in experiments [59, 60]. The level of cultivar resistance has been described using the official list provided by the French National Seed Station (Groupe d'Etude et de contrôle des Variétés et des Semences; <http://cat.geves.info/Page/ListeNationale>) and published by Arvalis-Institut du végétal (http://www.arvalisinfos.fr/_plugins/WMS_BO_Gallery/page/getElementStream.html?id=13504&prop=file). In this list, cultivars are rated for their susceptibility to eyespot on a 0-9 scale, from very susceptible to resistant.

For the climate attribute, a three-value scale ("Unfavourable"; "Favourable"; "Very favourable") was defined using climatic models [41, 61] and data from the INRA Climatik database.

All the scales in **Figure 18** are ordered from values detrimental to the crop (i.e. favourable to the disease) on the left-hand side to values beneficial to the crop on the right-hand side (i.e. unfavourable to the disease). In the DEXi software, this difference is clearly visible because, by convention, values beneficial to the user are coloured in green, detrimental in red, and neutral in black. The scales for the "tillage after preceding crop" and "tillage after pre-preceding crop" attributes appear in black since their effects on the disease cannot be defined independently from the crop sequence.

Attribute	Scale
Final incidence of eyespot	100%; 80-100 %; 60-80 %; 40-60 %; 20-40 %; 0-20 %; 0%
-Effects of cropping practices	Favourable; Moderately favourable; Unfavourable
-Primary inoculum management: interaction between crop sequence and tillage	Favourable; Moderately favourable; Unfavourable
-Preceding crop	Host; Risk amplifying non-host; Non host
-Pre-preceding crop	Host; Risk amplifying non-host; Non host
-Tillage after harvest of the previous crop	Non-inversion tillage; Inversion tillage
-Tillage after harvest of the pre-previous crop	Non-inversion tillage; Inversion tillage
-Escape: effects of the sowing date	Early sowing; Normal sowing date; Late sowing
-Mitigation through crop status	Favourable; Moderately favourable; Unfavourable
-Cultivar choice	Very susceptible to susceptible; Moderately susceptible; Quite to very resistant
-Level of N fertilisation	Excess level; Balanced level
-Sowing rate	High; Normal; Low
-Chemical control: use of fungicide	None; One
-Effects of soil and climate	Very favourable; Favourable; Unfavourable
-Soil	Favourable; Neutral
-Climate	Very favourable; Favourable; Unfavourable
-Autumn/winter	Very favourable; Favourable; Unfavourable
-Spring	Very favourable; Favourable; Unfavourable
-Interactions with the territory	Favourable; Neutral
-Beneficial sources	Normal; Important
-Primary inoculum sources	Important; Normal

Figure 18 : Attribute scales of IPSIM-Wheat-Eyespot (screenshot of the DEXi software). All the scales are ordered from values detrimental to the crop (i.e. favourable to eyespot) on the left-hand side to values beneficial to the crop on the right-hand side (i.e. unfavourable to eyespot). In the DEXi software, this difference is clearly visible because, by convention, values beneficial to the user are coloured in green, detrimental in red, and neutral in black.

Initial input attribute values (either quantitative or qualitative) are translated into qualitative appreciation, according to two to three scales defined on the basis of available information in the literature, models or expertise. Sometimes, a two-value scale is enough to represent the value of an indicator (e.g. chemical control was applied or not; or the soil has either been ploughed or not after the preceding harvest). However, other attributes usually need a three-value scale to describe the diversity of CP or environment (e.g. the sowing rate attribute requires three grades to describe farmers' practices: the sowing rate can be low, normal or high).

2.1.4. Definition of Utility Functions

The third step in the design of a DEXi model is the choice of utility functions determining the aggregation of attributes in the tree and their interactions. For each aggregated attribute in the model, a set of "if-then" rules define the value of the attribute concerned as a function of the values of its immediate descendants in the model. The rules that correspond to a single aggregated attribute are gathered together and conveniently represented in tabular form. In this way, each table defines

a mapping of all value combinations of lower-level attributes into the values of the aggregate attribute. **Figure 19** shows decision rules that correspond to the "mitigation through crop status" aggregated attribute and define the value of this attribute for the 18 possible combinations of the three cultivar choices, the 2 levels of fertilisation and the 3 sowing densities. For example, if the cultivar is quite resistant, the level of N fertilisation balanced and the sowing rate low, then the "mitigation through crop status" attribute will be unfavourable to eyespot (the final incidence will decrease). However, even if the sowing rate and the N application rate are both high, the "mitigation through crop status" attribute during wheat growth will control eyespot significantly because the "cultivar choice" attribute is much more influential than the two other attributes (**Figure 19**).

	Cultivar choice	Level of N fertilisation	Sowing rate	Mitigation through crop status
1	Very susceptible to susceptible	Excess level	High	Favourable
2	Very susceptible to susceptible	Excess level	Normal	Favourable
3	Very susceptible to susceptible	Excess level	Low	Favourable
4	Very susceptible to susceptible	Balanced level	High	Favourable
5	Very susceptible to susceptible	Balanced level	Normal	Favourable
6	Very susceptible to susceptible	Balanced level	Low	Favourable
7	Moderately susceptible	Excess level	High	Moderately favourable
8	Moderately susceptible	Excess level	Normal	Moderately favourable
9	Moderately susceptible	Excess level	Low	Moderately favourable
10	Moderately susceptible	Balanced level	High	Moderately favourable
11	Moderately susceptible	Balanced level	Normal	Moderately favourable
12	Moderately susceptible	Balanced level	Low	Moderately favourable
13	Quite to very resistant	Excess level	High	Unfavourable
14	Quite to very resistant	Excess level	Normal	Unfavourable
15	Quite to very resistant	Excess level	Low	Unfavourable
16	Quite to very resistant	Balanced level	High	Unfavourable
17	Quite to very resistant	Balanced level	Normal	Unfavourable
18	Quite to very resistant	Balanced level	Low	Unfavourable

Figure 19: Utility function for the "Mitigation through crop status" aggregated attribute (screenshot of the DEXi software). Aggregation rules for the 18 possible combinations of the 3 cultivar choices, the 2 levels of fertilisation and the 3 sowing rates.

The utility functions of IPSIM-Wheat-Eyespot have been established using knowledge available in the international literature and summarised in **Table 11**, and expert knowledge when needed. All utility functions of the model are presented in **Annex 7 to 11**.

Factor	Direction of the effect	Intensity of the effect	Impact on eyespot development	References
Tillage	+/-	++	Contradictory results. For some authors, reduced soil tillage decreased eyespot infection. For others, eyespot was often more severe after ploughing than after non-inversion tillage.	[1,11,41,42,44-55]
Preceding and pre-preceding crop	+	++	Preceding and pre-preceding host crops are known to favour eyespot. However, the interaction between tillage and the crop sequence has to be taken into account.	[9,10,29,41-42,55,61,62]
Sowing date	+	++	Eyespot has always been reported to be more severe in early sown crops.	[10,20,27,29,42,55]
N fertilisation rate	+	+	High nitrogen availability generally favoured the disease. However these results were questioned.	[9,10,20,29,56,57]
Sowing rate	+	+	Prevalence was increased by high plant density and/or low shoot number per plant.	[20,29]
Cultivar choice	+	+++	The use of varieties with resistance could obviate the need for fungicide.	[10,21,22,42,58,59]
Cultivar mixture	0	0	No significant difference was found between the disease level in mixtures and the mean of disease level of the mixture components in pure stands.	[70-72]
Climate	+	++	Eyespot strongly depends on climate. Infections require periods of at least 15 h with T° between 4°C and 13°C and HR>80% (from October to April).	[9,27,28,29,43]

Cropping practices and climate can be favourable (+), unfavourable (-) or neutral (0) to the development of eyespot. The intensity of the considered factor is summarised with 4 classes: 0, no effect; +, slight; ++, significant; +++, crucial.
doi:10.1371/journal.pone.0075829.t001

Tableau 11 : Available knowledge in the scientific literature describing the effects of Cropping Practices and the Production Situation on the incidence of eyespot on wheat. Cropping practices and climate can be favourable (+), unfavourable (-) or neutral (0) to the development of eyespot. The intensity of the considered factor is summarised with 4 classes: 0, no effect; +, slight; ++, significant; +++, crucial

2.1.5. Attribute Weights

The influence of each basic and aggregated attribute on the value of the output variable can be characterised by weighting them. The higher the weight, the more important the attribute. **Table 12** summarises the weights of each of the 19 attributes of the model, providing an overview of the model's structure.

Attributes defining the final incidence of eyespot	Local level 1	Local level 2	Local level 3	Global level 1	Global level 2	Global level 3
1 Effects of cropping practices	47			47		
1.1 Primary inoculum management		21			10	
1.1.1 Preceding crop			40			4
1.1.2 Pre-preceding crop			12			1
1.1.3 Tillage after the preceding crop			40			4
1.1.4 Tillage after pre-preceding crop			8			1
1.2 Escape: effects of sowing date		9			4	
1.3 Mitigation through crop status		26			12	
1.3.1 Cultivar choice			100			12
1.3.2 Level of N fertilisation			0			0
1.3.3 Sowing rate			0			0
1.4 Chemical control		44			21	
2 Effects of soil and climate	53			53		
2.1 Soil		0			0	
2.2 Climate		100			53	
2.2.1 Autumn/winter			29			15
2.2.2 Spring			71			38
3 Interactions with the rest of the territory	0			0		

The "local" and "global" weights are calculated for each aggregated attribute separately and are distributed in 3 levels of aggregation. Bold and non-bold terms represent basic attributes and aggregated terms, respectively.
doi:10.1371/journal.pone.0075829.t002

Tableau 12 : Respective weights of the attributes of IPSIM-Wheat-eyespot. The "local" and "global" weights are calculated for each aggregated attribute separately and are distributed in 3 levels of aggregation. Bold and non-bold terms represent basic attributes and aggregated terms, respectively.

IPSIM-Wheat Eyespot has 3 levels of aggregation (**Figure 17**), the third one being the leaves (i.e. the model input basic attributes). The "local" and "global" weights are normalised in two different ways. "Local" weights are given to each aggregated attribute separately so that the sum of weights of its immediate descendants in the hierarchy equals 100%. The "global" weights are calculated at a given level of aggregation and express the influence of each attribute at that aggregation level. They are obtained by multiplying the local weight of a given attribute at a given level of aggregation, by local weighting of its ascendants. For instance, the value of the "soil and climate" attribute is completely defined by the "Climate" attribute (100%, local weight), but this attribute only contributes 53% to the definition of the value of "Eyespot incidence" (global weight at the second level of aggregation). Local and global weights are identical at the first level of aggregation, since in this case there is only one level of aggregation. Global weights of basic attributes are shown in bold in Table 12 in order to ease their identification, since they are distributed among the second and third levels of aggregation of IPSIM-Wheat-Eyespot. The sum of global

weights at the third level is only 76%. This is because some basic attributes are directly embedded in the model at the second level of aggregation. The sum of global basic attribute weights is logically equal to 100%. **Table 12** can be seen as an equivalent of a sensitivity analysis that would aim at identifying the most influential input (and state) variables of a quantitative model.

2.1.6. Simulations with DEXi

The qualitative final attribute value (final incidence of eyespot) is calculated by DEXi. The calculation consists in computing all aggregated attribute values according to: (i) the structure of the tree; (ii) a set of input variables (basic attribute values) defining a simulation unit; and (iii) the utility functions for the aggregation of attributes. An example of output results obtained for two simulation units is provided in Figure 4 (input basic attributes and calculated aggregated attribute values for the simulation of two systems: an organic and a high-input one).

Attribute	Organic system	High input system
Final incidence of eyespot	20-40 %	60-80 %
-Effects of cropping practices	<i>Unfavourable</i>	Moderately favourable
-Primary inoculum management: interaction between crop sequence and tillage	<i>Unfavourable</i>	Favourable
-Preceding crop	<i>Non host</i>	Host
-Pre-preceding crop	<i>Non host</i>	Host
-Tillage after harvest of the previous crop	Inversion tillage	Non-inversion tillage
-Tillage after harvest of the pre-previous crop	Inversion tillage	Non-inversion tillage
-Escape: effects of the sowing date	<i>Late sowing</i>	Early sowing
-Mitigation through crop status	<i>Unfavourable</i>	Favourable
-Cultivar choice	<i>Quite to very resistant</i>	Very susceptible to susceptible
-Level of N fertilisation	<i>Balanced level</i>	<i>Balanced level</i>
-Sowing rate	High	Normal
-Chemical control: use of fungicide	None	One
-Effects of soil and climate	Very favourable	Very favourable
-Soil	Favourable	Favourable
-Climate	Very favourable	Very favourable
-Autumn/winter	Favourable	Very favourable
-Spring	Very favourable	Very favourable
-Interactions with the territory	<i>Neutral</i>	<i>Neutral</i>
-Beneficial sources	Normal	Normal
-Primary inoculum sources	<i>Normal</i>	<i>Normal</i>

Figure 20 : Example of 2 simulations carried out with IPSIM-Wheat-Eyespot (screenshot of the DEXi software).

2.2. Evaluation of the Predictive Quality of IPSIM-Wheat-Eyespot

2.2.1. Description of the Dataset Used

Data representative of a wide range of climate patterns, soils and CPs are needed to assess the predictive quality of the model. A large dataset was therefore developed to assess the predictive quality of IPSIM-Wheat-Eyespot. A national survey was conducted to identify relevant data from various research and development institutes. The required datasets had to provide information for input attributes of IPSIM-Wheat-Eyespot (description of CP, soil and climate) and its output (eyespot incidence at the "milky grain", stage 7: development of fruit on BBCH scale [62]). The dataset obtained is summarised in Table 3. It comprises results from multifactorial trials from 1980 to 1994 in 7 contrasting regions in France, which were set up to analyse the effects of various CP on foot and root winter wheat diseases on different soils and with differing climate patterns. Various cultivars were combined with different crop sequences, conventional and reduced tillage, low or high plant densities, early or late sowing dates, low or high N fertilisation, in various areas of production where eyespot epidemics are observed. Most of these trials were specific studies on foot diseases [20, 39, 59, 60, 63], so the experimental conditions were suited to ensure the presence of eyespot (i.e. infected wheat present in the crop sequence and only susceptible cultivars). Other data originated from a regional agronomic diagnosis [64] performed in cereal fields from 1987 to 1994 in 19 French regions to analyse the effects of cultural practices on the incidence and severity of foot and root disease complexes [64]. In this survey, data were collected on 894 cereal fields in a wide range of PS.

Cropping practice	Design	Year	Location	Number of site-years	References
Crop sequence	Multifactorial field trials	1981-1982	Toulouse (Midi-Pyrénées)	11	[61]
Crop sequence including various durations of continuous cereal cropping	Multifactorial field trials	1980-1994	Grignon (Ile-de-France)	29	[62]
Tillage (soil structure)	Multifactorial field trials	1992-1993	Péronne (Picardie)	8	[73]
Tillage (crop residue vertical distribution)	Multifactorial field trials	1992-1993	Chartres (Centre), Grignon (Ile-de-France)	12	[41]
Sowing date, sowing rate, N fertilisation	Multifactorial field trials	1992-1994	Chartres, La Verrière (Ile-de-France), Le Rheu (Bretagne), Nancy (Lorraine), Dijon (Bourgogne)	95	[20]
Tillage, previous crop, fertilisation, sowing rate, sowing date, cultivar choice and use of fungicide	Diagnoses in cereal fields	1987-1994	19 French regions	370	[64]
Crop sequence	Multifactorial field trials	1981-1982	Toulouse (Midi-Pyrénées)	11	[61]
Crop sequence including various durations of continuous cereal cropping	Multifactorial field trials	1980-1994	Grignon (Ile-de-France)	29	[62]
Tillage (soil structure)	Multifactorial field trials	1992-1993	Péronne (Picardie)	8	[73]
Tillage (crop residue vertical distribution)	Multifactorial field trials	1992-1993	Chartres (Centre), Grignon (Ile-de-France)	12	[41]
Sowing date, sowing rate, N fertilisation	Multifactorial field trials	1992-1994	Chartres, La Verrière (Ile-de-France), Le Rheu (Bretagne), Nancy (Lorraine), Dijon (Bourgogne)	95	[20]
Tillage, previous crop, fertilisation, sowing rate, sowing date, cultivar choice and use of fungicide	Diagnoses in cereal fields	1987-1994	19 French regions	370	[64]

doi:10.1371/journal.pone.0075829.t003

Tableau 13 : Main features of the datasets used for the evaluation of IPSIM-Wheat-Eyespot's predictive quality.

For some situations, the pre-preceding crop (3 possible types of crop in the model: "host", "non-host" and "risk amplifying") and the associated tillage after the harvest of this crop (2 possible values in the model) were not observed. Instead of ignoring these precious data, simulations were performed for the 3*2 possibilities and only cases for which the 6 simulations led to similar output values were kept for evaluating the model. In all, 526 site-years were used for the evaluation of the model and they represented a large number of combinations of CP and production situations (19 French regions over 9 years).

The data presented in **Table 13** were transformed into qualitative values and used as input basic attributes to feed IPSIM-Wheat-Eyespot.

2.2.2. Evaluation of the Predictive Quality of IPSIM-Wheat-Eyespot

The evaluation consisted in comparing simulated and observed values. Since the model predicts classes of incidence, observed incidences at wheat stage 7 were transformed into observed incidence classes using the same discretisation as the model (i.e. 0-20%, 2-40%, 40-60%, 60-80%, 80-100%). However, one might want to predict incidences rather than classes of incidence. In order to test the predictive quality of IPSIM-Wheat-Eyespot for incidences, its output main variable was transformed into a numerical value by replacing the predicted incidence class by the centre of the class. The model was therefore evaluated in two ways: first, on its ability to predict incidence classes, and second on its ability to predict eyespot incidences.

➤ **Quality of Prediction for Incidence Classes**

The deviation of the model was characterised by calculating the number of classes of difference between observed and simulated classes. The distribution of simulated classes was displayed according to observed incidence classes. This information was summarised by a multinomial distribution in 9 difference classes (from - 4 to +4) since the model has 5 incidence classes. The proportion of situations for which the model correctly predicted the observed incidence class was taken as an indicator of the quality of prediction of the model. In addition, a non-parametric Wilcoxon test was performed to test whether the distribution of errors was zero-centred (in that case, the model can be considered unbiased).

➤ **Quality of Prediction for Incidences**

The predictive quality of IPSIM-Wheat-Eyespot was characterised using three common statistical criteria [65]: bias (Equation 1), Root Mean Square Error of Prediction (RMSEP, Equation 2), and efficiency (Equation 3).

$$Bias = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^{i=n} (Y_i^{obs} - Y_i^{sim}) \quad \text{Equation 1}$$

where n is the total number of considered situations, Y_i^{obs} the observed value for situation i , and Y_i^{sim} is the corresponding value simulated by the model. The bias measures the average difference between observed and simulated values. If the model underestimates the variable concerned, the bias is positive. Conversely, if the model overestimates the variable, the bias is negative.

$$RMSEP = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^{i=n} (Y_i^{obs} - Y_i^{sim})^2} \quad \text{Equation 2}$$

RMSEP quantifies the prediction error when the model parameters have not been estimated using the observations Y_i^{obs} used in the calculation of this criterion.

$$EF = 1 - \frac{\sum_{i=1}^{i=n} (Y_i^{obs} - Y_i^{sim})^2}{\sum_{i=1}^{i=n} (Y_i^{obs} - \bar{Y})^2} \quad \text{Equation 3}$$

Where \bar{Y} is the mean of observed data. Nash and Sutcliffe [66] defined the efficiency as a normalised statistic that determines the relative magnitude of the residual variance (“noise”) compared with the measured data variance (“information”). The efficiency defines the ability of a model to predict the value of a variable. The efficiency can range from $-\infty$ to 1. If the model perfectly predicts the observations, the efficiency is maximum and is equal to 1. Efficiency values lower than 0 indicate that the mean observed value is a better predictor than the simulated values, which indicate a poor predictive quality of the model. Values between 0 and 1 are generally viewed as acceptable levels of performance. The closer the model efficiency is to 1, the better is the fit between observed and simulated data [65].

3. Results

3.1. Evaluation of the Quality of Prediction for Final Incidence Classes

The high number of observed fields in the dataset (526) permitted a reliable evaluation of the predictive quality of IPSIM-Wheat-Eyespot. Residuals were distributed around 0 (**Figure 21**), indicating that the predicted values are close to observations. Nearly half (49.5%) of the simulated classes encompassed the observed values and 80.5% had at most a difference of one class only. In addition, there are nearly as many negative as positive differences of exactly one class. The Wilcoxon test for the -1; 0; 1 differences showed that the model was not biased in this range ($p = 0.44$). However, the Wilcoxon test performed over the 9 class differences (from -4 to +4) proved that the model was significantly biased (simulated final incidence classes lower than observations, $p < 1.0 \cdot 10^{-10}$).

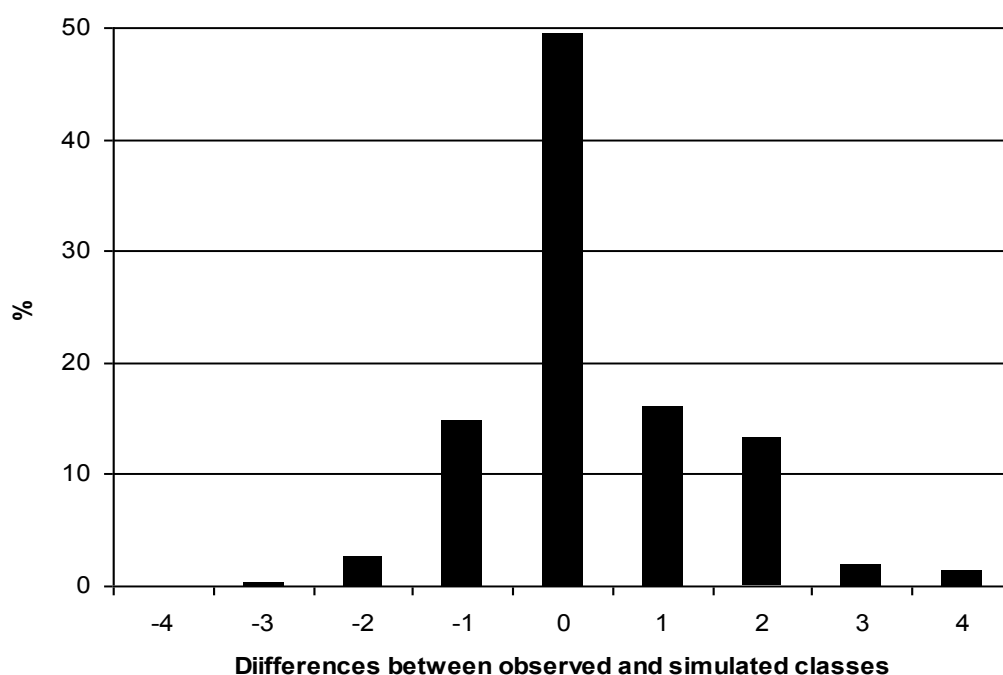


Figure 21 : Evaluation of the predictive quality of IPSIM-Wheat-Eyespot. Residuals distribution: number of classes of difference between observed and simulated final eyespot classes (0-20%, 20-40%, 40-60%, 60-80%, 80-100%; 526 fields, over 9 years and 19 French regions).

Figure 22 illustrates the distribution of class differences between observed and predicted final eyespot incidences. The overall predictive quality of IPSIM-Wheat-Eyespot was judged fair, even if slightly biased. The predictive quality was good for the lowest class (52% of all the observations in the dataset): 80% of the observed values between 0 and 20% were correctly simulated. The model underestimated final incidences for observations higher than 20%.

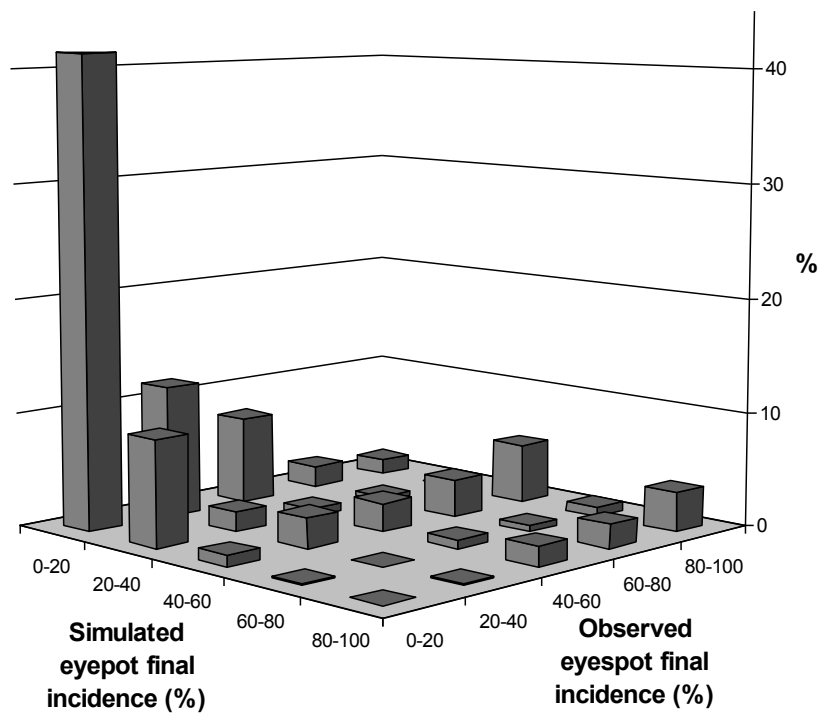


Figure 22 : Evaluation of the predictive quality of IPSIM-Wheat-Eyespot Distribution of class differences between observed and predicted final eyespot incidences (526 fields, over 9 years and 19 French regions).

3.2. Evaluation of the Quality of Prediction for Final Incidence Values

For these 526 output values, the overall predictive quality of the model was correct. The model's predictive quality was good as its efficiency value was high: 0.64. The Root Mean Square Error of Prediction error was quite high, 25%, since incidences range between 0 and 100%. The bias was positive (6.2 %), so the model slightly underestimated final eyespot incidences.

4. DISCUSSION

4.1. Interests and Limitations of IPSIM-Wheat-Eyespot

Several studies have been conducted to analyse the effects of CP on the development of eyespot on wheat [10, 29]. However, only one statistical model had been developed in order to predict the incidence of eyespot as a function of few CP [29]. IPSIM-Wheat-Eyespot offers new possibilities for the design of innovative cropping systems since it is the first functional model to encompass simultaneously the effects of soil, climate and the cropping system and to represent the effects of interactions among these many factors.

The development of IPSIM-Wheat-Eyespot was made possible using (1) a schematic representation of the relationships between CP, the PS and injuries, (2) the translation of this conceptual scheme into a simulation model, and (3) a combination of data from a wide range of production situations (many regions and years) to test its predictive quality.

4.1.1. Conceptual Basis of IPSIM-Wheat-Eyespot

The conceptual scheme of IPSIM-Wheat-Eyespot is innovative because i) it encompasses a temporal scale longer than the cropping season (effect of the crop sequence in interaction with tillage over two years); ii) the main CPs that can affect the disease are represented; iii) interactions between practices as well as interactions between practices and climate are taken into account. As compared to the conceptual scheme of IPSIM [33], the spatial scale considered was limited to the field because of the lack of interactions at larger scales. In addition, the conceptual scheme of IPSIM-Wheat-Eyespot does not take into account socio-economic drivers, farmer's goals and cognition since it does not aim at simulating decisions. However, this original conceptual model can help design innovative cropping systems less susceptible to eyespot. The information provided by IPSIM-Wheat-Eyespot should be combined with other sources of information (references, other models, or expertise) in order to design new cropping systems, especially since damage (*i.e.* crop loss) caused by the disease are not represented.

4.1.2. *Hierarchical Tree of Attributes and Utility Functions*

The qualitative nature of the DEX method is well suited to the modelling of complex systems for which no high level of precision is required. The DEXi software tool [36] offered a suitable environment for the organisation of available knowledge and a rapid development of IPSIM-Wheat-Eyespot. The main breakthrough of the IPSIM platform is to allow the handling of complexity in a simple way [33]. The work presented in this paper provides a proof of concept for this innovative modelling approach in the field of crop protection for a single disease. A major innovation of this modelling approach is to be able to aggregate attributes of different natures (e.g. cultivar choice, a nominal variable and fertilisation rate, a quantitative variable) to describe the impact of various components of cropping systems and their interactions on eyespot incidence. IPSIM-Wheat-Eyespot is actually the first model which can overcome the lack of data on the relationships between CP and a single pest in a given PS to help design strategies to control the disease. The qualitative DEXi approach may lead to a loss of precision and sensitivity in the developed model [67]. Increasing the number of attribute scales at the top of the decision tree could be a way to improve the sensitivity [68]. However, it results in more complicated utility functions which are consequently more difficult to define. Due to the tremendous complexity of interactions between CP and PS, a smaller number of indicator states have been chosen to keep the representation of the complex underlying mechanisms as simple as possible. A correct definition of utility functions is of primary importance in DEXi models [68]. The choice of the nature and the number of qualitative scales is also crucial and will partly determine the quality of prediction. The choices of both utility functions and qualitative scales of attributes have to be explicit and traceable. Indeed, the scales and the utility functions used for the attributes of IPSIM-Wheat-Eyespot could not be determined in a generic way but have been specifically defined according to experimental results, models available in the literature and expert knowledge if need be. Unfortunately, literature to analyse some attributes may not exist, lack certain features, or controversial. For instance, the impact of soil type on eyespot incidence is very poorly described in the international literature and the relationships between tillage and eyespot are subject to much controversy [41]. For these cases, expert knowledge had to be used to complete some utility functions. In addition, the model runs using simple "if-then" rules, which are "shallow" in the sense

that they only define direct relationships between conditions and consequences, but do not represent any "deeper" (or mechanistic) biological, physical, chemical processes [69]. Since the early stages of development of IPSIM-Wheat-Eyespot, it has been clear that precision was not an objective of the model. It appears more important to focus on accuracy rather than precision when modelling such a complex system.

Table 12 reveals the overall behaviour of IPSIM-Wheat-Eyespot. This is also an additional value of the IPSIM approach: the model is transparent and can be easily discussed. For instance, it is clear that the overall effect of fungicide on the disease is low (21%). This is because fungicide does not always control the disease efficiently [58]. The main factor influencing the disease is the spring weather (38 %). This is consistent with Matusinsky et al. [41] who showed that the disease was very dependent on the climatic conditions during spring.

4.1.3. Predictive Quality of IPSIM-Wheat-Eyespot

The quality of the analysis of the IPSIM-Wheat-Eyespot predictive quality not only depends on the model itself (hierarchical structure of attributes and utility functions) but also on the diversity of the data used, which must reflect a wide range of PS. These data should represent a variety of soil, climate and CPs, but also of final incidences. The dataset used in this study satisfied the three former conditions, but did not fully satisfy the latter. The observed final eyespot incidences were generally quite low, so the predictive quality of IPSIM-Wheat-Eyespot could not be extensively evaluated for high levels of incidence.

The main difference with other models is that IPSIM-Wheat-Eyespot is based on qualitative variables and not quantitative ones. The use of qualitative data requires greater attention to the description of the adopted hypotheses, because qualitative data are more difficult to interpret objectively [67]. This is particularly the case for the transformation of quantitative variables that have to be translated into qualitative input of IPSIM-Wheat-Eyespot (e.g. sowing density expressed in kg/ha or number of seeds m⁻² and translated into "low", "normal" or "high"). Thus, IPSIM-Wheat-Eyespot can be used in 2 ways. On the one hand, some users can provide directly qualitative

basic attributes (i.e. input variables of the model) if they want to test the performance of some technical options in given production situations. On the other hand, other users might want to run the model for real or putative situations where both PS and CP are characterised with quantitative, qualitative or nominative data. In this case, an algorithm should be developed in order to rigorously translate these data into appropriate basic attributes based on national or international official references (e.g. a given cultivar will be classified as "very susceptible to susceptible"; "moderately susceptible"; or "resistant" according to official national or international seed classification); regional references (e.g. a given sowing date will be classified as "early"; "normal"; "late" as a function of regional references established by extension services); knowledge available in the literature (e.g. a given crop will be classified as "host", "non-host", or "risk-amplifying crop" according to published scientific articles); references produced by models (e.g. a given weather scenario can be classified as "very favourable"; "favourable"; or "unfavourable" according to a published model).

IPSIM-Wheat-Eyespot proved to fairly represent the variability of the 526 "site-years" used to test its predictive quality. This indicates that the model is already operational and can represent the effects of a wide range of PS*CP combinations for eyespot epidemics to help design cropping systems less susceptible to the disease. This is remarkable since, unlike any other model, no fitting procedure was used.

4.2. Prospects

4.2.1. *Improvements to the Model*

Further refinements could be added in the future. They should keep the balance between: i) modelling of the effects of CP and PS on eyespot epidemics as accurately as possible, and ii) keeping the model as simple as possible. In addition to the design of a model, the approach presented in this article allowed us to structure the available knowledge in the literature about the effects of CP and PS on eyespot epidemics (**Table 11**). Utility functions derived from **Table 11** could be easily adapted according to future advances in the knowledge of underlying mechanisms responsible for the disease. In the same way, the model structure could easily be modified to integrate new knowledge. For instance, the model does not yet take into

account the effects of cultivar mixtures, whereas some authors have described a reduction of eyespot by cultivar mixtures [70-72]. However, this CP is not currently widespread, data are sparse and there is no consensus in the literature on this matter.

IPSIM-Wheat-Eyespot requires the provision of qualitative basic attributes. This is a benefit for the *ex-ante* design of innovative cropping systems. However, this requires translating nominative or quantitative variables used to describe CP and PS into *ad hoc* qualitative variables. In order to avoid subjectivity when translating these variables, some reference values have to be used. Such values were gathered for several French regions (data not shown) in order to design an algorithm that translates nominative or quantitative variables describing CP and PS into relevant basic attributes of the model. This algorithm can be easily adapted to any location where wheat is grown and eyespot is present, provided that relevant reference values are available. Moreover, a sensitivity analysis of IPSIM-Wheat-Eyespot could be performed in order to identify the most influential attributes. This work may help adjusting utility functions to improve IPSIM-Wheat-Eyespot's predictive quality using statistical procedures, as done for parameter estimation for quantitative models.

4.2.2. *Future Use of the Model*

The main breakthrough of the IPSIM framework, with a simple hierarchical aggregative structure, is to allow the handling of complexity in a simple way. The input variables of models developed with IPSIM, such as IPSIM-Wheat-Eyespot, are easily obtained [33]. IPSIM-Wheat-Eyespot will help design cropping systems with a lower risk of eyespot on wheat. In order to do so, simulation plans will be defined to assess the performance of CPs in a given PS with regard to the control of the disease. It is obvious that this simulation work will have to be combined with other sources of information such as other models, expert knowledge, diagnoses in commercial fields or experiments to propose innovative sustainable cropping systems.

The model, along with the interface that translates nominative and quantitative variables into relevant qualitative input variables for IPSIM-Wheat-Eyespot

(Microsoft®OfficeExcel 2003), is now available upon request. This model can now be used as a communication, organisation, training and teaching tool for researchers, extension engineers, advisers, teachers or even farmers. Appropriation and adaptation of the model by technicians, advisers or farmers could be useful to exchange knowledge and experience (building up from their technical know-how).

The model presented in this paper only takes into account one pest among the biocenosis of a wheat field. Nevertheless, it is necessary to consider the entirety of the major pests when designing cropping systems because farmers have to manage combinations of pest populations, leading to injury profiles, which can in turn lead to quantitative or qualitative damage and ultimately economic losses. In addition to being a model specific to a given disease, IPSIM-Wheat-Eyespot can also be seen as the first sub-model of IPSIM-Wheat, a model that will predict injury profiles on wheat as a function of CP and PS.

References

1. Montanari M, Innocenti G, Toderi G (2006) Effects of cultural management on the foot and root disease complex of durum wheat. *Journal of Plant Pathology* 88: 149-156.
2. Lucas JA, Dyer PS, Murray TD (2000) Pathogenicity, host-specificity, and population biology of *Tapesia* spp., causal agents of eyespot disease of cereals. *Advances in Botanical Research Incorporating Advances in Plant Pathology*, Vol 33 33: 225-258.
3. Crous PW, Groenewald JZ, Gams W (2003) Eyespot of cereals revisited: ITS phylogeny reveals new species relationships. *European Journal of Plant Pathology* 109: 841-850.
4. Ray RV, Jenkinson P, Edwards SG (2004) Effects of fungicides on eyespot, caused predominantly by *Oculimacula acuformis*, and yield of early-drilled winter wheat. *Crop Protection* 23: 1199-1207.
5. Ray RV, Crook MJ, Jenkinson P, Edwards SG (2006) Effect of eyespot caused by *Oculimacula yallundae* and *O. acuformis*, assessed visually and by competitive PCR, on stem strength associated with lodging resistance and yield of winter wheat. *Journal of Experimental Botany* 57: 2249-2257.
6. Dyer PS, Nicholson P, Lucas JA, Peberdy JF (1996) *Tapesia acuformis* as a causal agent of eyespot disease of cereals and evidence for a heterothallic mating system using molecular markers. *Mycological Research* 100: 1219-1226.
7. Scott PR, Hollins TW (1974) Effects of eyespot on the yield of winter wheat. *Annals of Applied Biology* 78: 269-279.
8. Clarkson JDS (1981) Relationship between eyespot severity and yield loss in winter-wheat. *Plant Pathology* 30: 125-131.
9. Fitt BDL, Goulds A, Polley RW (1988) Eyespot (*Pseudocercospora herpotrichoides*) epidemiology in relation to prediction of disease severity and yield loss in winter-wheat - a review. *Plant Pathology* 37: 311-328.
10. Fitt BDL, Goulds A, Hollins TW, Jones DR (1990) Strategies for control of eyespot (*Pseudocercospora herpotrichoides*) in UK winter wheat and winter barley. *Annals of Applied Biology* 117: 473-486.
11. Clarkson JP, Lucas JA (1993) Screening for potential antagonists of *Pseudocercospora herpotrichoides*, the causal agent of eyespot disease of cereals 1. Bacteria. *Plant Pathology* 42: 543-551.
12. Russell PE (2005) A century of fungicide evolution. *Journal of Agricultural Science* 143: 11-25.
13. Leroux P, Gredt M (1997) Evolution of fungicide resistance in the cereal eyespot fungi *Tapesia yallundae* and *Tapesia acuformis* in France. *Pesticide Science* 51: 321-327.
14. Leroux P, Gredt M, Albertini C, Walker AS (2006) Characteristics and distribution of strains resistant to fungicides in the wheat eyespot fungi in France
Caracteristiques et distribution des souches résistantes aux fongicides chez les agents responsables du pietin-verse du ble en France. 8eme Conference Internationale sur les Maladies des Plantes, Tours, France, 5 et 6 Decembre, 2006. pp. 574-583.
15. Stote C, Boatman ND, Borralho RJ, Carvalho CR, Snoo GRd, et al. (2001) Ecological impacts of arable intensification in Europe. *Journal of Environmental Management* 63: 337-365.

16. Bell EM, Sandler DP, Alavanja MC (2006) High pesticide exposure events among farmers and spouses enrolled in the agricultural health study. *Journal of Agricultural Safety and Health* 12: 101-116.
17. Paillot G (2008). *Ecophyto2018*. Chantier 15 « agriculture écologique et productive » Rapport final du Président du Comité opérationnel. Ministère de l'agriculture et de la pêche.
18. Epstein L, Bassein S (2003) Patterns of pesticide use in California and the implications for strategies for reduction of pesticides. *Annual Review of Phytopathology* 41: 351-375.
19. Birch ANE, Begg GS, Squire GR (2011) How agro-ecological research helps to address food security issues under new IPM and pesticide reduction policies for global crop production systems. *Journal of Experimental Botany* 62: 3251-3261.
20. Colbach N, Saur L (1998) Influence of crop management on eyespot development and infection cycles of winter wheat. *European Journal of Plant Pathology* 104: 37-48.
21. Doussinault G, Delibes A, Sanchez-Monge R, Garcia-Olmedo F (1983) Transfer of a dominant gene for resistance to eyespot disease from a wild grass to hexaploid wheat. *Nature*, UK 303: 698-700.
22. Wei L, Muranty H, Zhang H (2011) Advances and prospects in wheat eyespot research: contributions from genetics and molecular tools. *Journal of Phytopathology* 159: 457-470.
23. Murray TD, Delapena RC, Yildirim A, Jones SS (1994) A new source of resistance to *Pseudocercospora-herpotrichoides*, cause of eyespot disease of wheat, located on chromosome-4v of *Dasypyrum-villosum*. *Plant Breeding* 113: 281-286.
24. Savary S, Mille B, Rolland B, Lucas P (2006) Patterns and management of crop multiple pathosystems. *European Journal of Plant Pathology* 115: 123-138.
25. Bergez JE, Colbach N, Crespo O, Garcia F, Jeuffroy MH, et al. (2010) Designing crop management systems by simulation. *European Journal of Agronomy* 32: 3-9.
26. Aubertot JN, Doré T, Ennaifar S, Ferré F, Fourbet J.F, Schneider O (2005). Integrated Crop Management requires to better take into account cropping systems in epidemiological models. *Proceedings of the 9th International Workshop on Plant Disease Epidemiology*. 11-15 April 2005. Landerneau, France.
27. Payen D, Rapilly F, Galliot M (1979) Effect of the sowing date on the climatic potentialities of winter infections of soft winter wheat by eyespot in France. *Comptes Rendus des Séances de l'Académie d'Agriculture de France* 7: 473-481.
28. Delos M (1995) Top: a model forecasting eyespot development. *Phytoma*: 26-28.
29. Colbach N, Meynard JM, Duby C, Huet P (1999) A dynamic model of the influence of rotation and crop management on the disease development of eyespot. Proposal of cropping systems with low disease risk. *Crop Protection* 18: 451-461.
30. Willocquet L, Aubertot JN, Lebard S, Robert C, Lannou C, et al. (2008) Simulating multiple pest damage in varying winter wheat production situations. *Field Crops Research* 107: 12-28.

31. Savary S, Willocquet L, Elazegui FA, Teng PS, Pham Van D, et al. (2000) Rice pest constraints in tropical Asia: characterization of injury profiles in relation to production situations. *Plant Disease* 84: 341-337.
32. Breman H, de Wit CT (1983) Rangeland Productivity and Exploitation in the Sahel. *Science* 221: 1341-1347.
33. Aubertot JN, Robin MH (submitted) Injury Profile Simulator, a hierarchical aggregative modelling framework to predict injury profile as a function of cropping practices, soil, climate and field environment. I. Conceptual bases.
34. Wiese MV (1987) Compendium of wheat diseases. Second edition. Compendium of wheat diseases Second edition: viii + 112 pp.
35. Bohanec M (2009) DEXi: program for multi-attribute decision making, Version 3.02. Jozef Stefan Institute, Ljubljana. Available: <http://www-ai.ijs.si/MarkoBohanec/dexi.html>. Accessed 22 November 2012
36. Griffiths BS, Ball BC, Daniell TJ, Hallett PD, Neilson R, et al. (2010) Integrating soil quality changes to arable agricultural systems following organic matter addition, or adoption of a ley-arable rotation. *Applied Soil Ecology* 46: 43-53.
37. Bohanec M (2003) Decision support. In: D. Mladenčić, N. Lavrač, M. Bohanec, S. Moyle (Eds.). *Data Mining and Decision Support: Integration and Collaboration*, Kluwer Academic Publishers (2003), pp. 23–35.
38. Bohanec M, Cortet J, Griffiths B, Znidarsic M, Debeljak M, et al. (2007) A qualitative multi-attribute model for assessing the impact of cropping systems on soil quality. *Pedobiologia* 51: 239-250.
39. Kropff MJ, Teng PS, Rabbinge R (1995) The challenge of linking pest and crop models. *Agricultural Systems* 49: 413-434.
40. Colbach N, Meynard JM (1995) Soil tillage and eyespot - influence of crop residue distribution on disease development and infection cycles. *European Journal of Plant Pathology* 101: 601-611.
41. Meynard JM, Dore T, Lucas P (2003) Agronomic approach: cropping systems and plant diseases. *Comptes Rendus Biologies* 326: 37-46.
42. Matusinsky P, Mikolasova R, Klem K, Spitzer T (2009) Eyespot infection risks on wheat with respect to climatic conditions and soil management. *Journal of Plant Pathology* 91: 93-101.
43. Vanova M, Matusinsky P, Javurek M, Vach M (2011) Effect of soil tillage practices on severity of selected diseases in winter wheat. *Plant Soil and Environment* 57: 245-250.
44. Jenkyn JF, Gutteridge RJ, Bateman GL, Jalaluddin M (2010) Effects of crop debris and cultivations on the development of eyespot of wheat caused by *Oculimacula* spp. *Annals of Applied Biology* 156: 387-399.
45. Cox J, Cock LJ (1962) Survival of *Cercospora herpotrichoides* on naturally infected straws of wheat and barley. *Plant Pathology* 11: 65–66.
46. Herrman T, Wiese MV (1985) Influence of cultural practices on incidence of foot rot in winter wheat. *Plant Disease* 69: 948-950.
47. Smiley RW, Collins HP, Rasmussen PE (1996) Diseases of wheat in long-term agronomic experiments at Pendleton, Oregon. *Plant Disease* 80: 813-820.
48. Innocenti G, Montanari M, Marengi A, Toderi G (2000) Influence of cropping systems on eyespot in winter cereals. *Ramulispora herpotrichoides* in cereali vernini in diverse situazioni culturali. *Atti, Giornate fitopatologiche, Perugia*, 16-20 aprile, 2000, Volume 2: 241-246.
49. Bailey KL, Gossen BD, Lafond GP, Watson PR, Derksen DA (2001) Effect of tillage and crop rotation on root and foliar diseases of wheat and pea in

- Saskatchewan from 1991 to 1998: univariate and multivariate analyses. *Canadian Journal of Plant Science* 81: 789-803.
50. Jenkyn JF, Christian DG, Bacon ETG, Gutteridge RJ, Todd AD (2001) Effects of incorporating different amounts of straw on growth, diseases and yield of consecutive crops of winter wheat grown on contrasting soil types. *Journal of Agricultural Science* 136: 1-14.
 51. Jalaluddin M, Jenkyn JF (1996) Effects of wheat crop debris on the sporulation and survival of *Pseudocercospora herpotrichoides*. *Plant Pathology* 45: 1052-1064.
 52. Anken T, Weisskopf P, Zihlmann U, Forrer H, Jansa J, et al. (2004) Long-term tillage system effects under moist cool conditions in Switzerland. *Soil & Tillage Research* 78: 171-183.
 53. Prew RD, Ashby JE, Bacon ETG, Christian DG, Gutteridge RJ, et al. (1995) Effects of incorporating or burning straw, and of different cultivation systems, on winter wheat grown on two soil types, 1985-91. *Journal of Agricultural Science* 124: 173-194.
 54. Burnett FJ, Hughes G (2004) The development of a risk assessment method to identify wheat crops at risk from eyespot. HGCA Project Report: 87 pp.
 55. Agrios GN (1997) Plant pathology. *Plant pathology*.
 56. Datnoff LE, Elmer WH, Huber DM (2007) Mineral nutrition and plant disease. *Mineral nutrition and plant disease*.
 57. Loyce C, Meynard JM, Bouchard C, Rolland B, Lonnet P, et al. (2008) Interaction between cultivar and crop management effects on winter wheat diseases, lodging, and yield. *Crop Protection* 27: 1131-1142.
 58. Zhang XY, Loyce C, Meynard JM, Savary S (2006) Characterization of multiple disease systems and cultivar susceptibilities for the analysis of yield losses in winter wheat. *Crop Protection* 25: 1013-1023.
 59. Parnell S, Gilligan CA, Lucas JA, Bock CH, Bosch Fvd (2008) Changes in fungicide sensitivity and relative species abundance in *Oculimacula yallundae* and *O. aciformis* populations (eyespot disease of cereals) in Western Europe. *Plant Pathology* 57: 509-517.
 60. Colbach N, Lucas P, Cavelier N (1994) Influence of crop succession on foot and root diseases of wheat. *Agronomie* 14: 525-540.
 61. Colbach N, Huet P (1995) Modelling the frequency and severity of root and foot diseases in winter wheat monocultures. *European Journal of Agronomy* 4: 217-227.
 62. Payen D, Rapilly F, Galliot M (1983) Effect of the sowing date on the climatic potentialities of winter infections of soft winter wheat by eyespot in France. Influence de la date de semis sur les potentialites climatiques de contaminations hivernales du ble tendre d'hiver par le pietin-verse en France. *Comptes Rendus des Seances de l'Academie d'Agriculture de France* 69: 473-481.
 63. Lancashire PD, Bleiholder H, Boom Tvd, Langeluddeke P, Stauss R, et al. (1991) A uniform decimal code for growth stages of crops and Weeds. *Annals of Applied Biology* 119: 561-601.
 64. Cavelier A, Cavelier N, Colas AY, Montfort F, Lucas P (1998) ITITECH: a survey to improve the evaluation of relationships between cultural practices and cereal disease incidence. Brighton Crop Protection Conference: Pests & Diseases - 1998: Volume 3: Proceedings of an International Conference, Brighton, UK, 16-19 November 1998: 1023-1028.

65. Dore T, Clermont-Dauphin C, Crozat Y, David C, Jeuffroy MH, et al. (2008) Methodological progress in on-farm regional agronomic diagnosis. A review. *Agronomy for Sustainable Development* 28: 151-161.
66. Wallach D, Makowski D, Jones J (2006). *Working Dynamic Crop Models : Evaluation, Analysis, Parameterization and Application*. Elsevier. 447p.
67. Nash JE, Sutcliffe JV (1970) River flow forecasting through conceptual models part I — A discussion of principles. *Journal of Hydrology* 10: 282-290.
68. Sadok W, Angevin F, Bergez JE, Bockstaller C, Colomb B, et al. (2009) MASC, a qualitative multi-attribute decision model for ex ante assessment of the sustainability of cropping systems. *Agronomy for Sustainable Development* 29: 447-461.
69. Pelzer E, Fortino G, Bockstaller C, Angevin F, Lamine C, et al. (2012) Assessing innovative cropping systems with DEXiPM, a qualitative multi-criteria assessment tool derived from DEXi. *Ecological Indicators* 18: 171-182.
70. Bohanec M, Messéan A, Scatista S, Angevin F, Griffiths B, et al. (2008) A qualitative multi-attribute model for economic and ecological assessment of genetically modified crops. *Ecological Modelling* 215: 247-261.
71. Vilichmeller V (1992) Mixed cropping of cereals to suppress plant-diseases and omit pesticide applications. *Biological Agriculture & Horticulture* 8: 299-308.
72. Mundt CC, Brophy LS, Schmitt MS (1995) Choosing crop cultivars and cultivar mixtures under low versus high disease pressure - a case-study with wheat. *Crop Protection* 14: 509-515.
73. Saur L, Mille B (1997) Disease progress of *Pseudocercospora herpotrichoides* in mixed stands of winter wheat cultivars. *Agronomie* 17: 113-118.
74. Colbach N (1995) Modélisation de l'influence des systèmes de culture sur les maladies du pied et des racines du blé tendre d'hiver. Doctorat de l'INA P-G, Paris, 258p.

Chapitre 2. Design and evaluation of IPSIM-Wheat-Brown Rust, a model that predicts Brown Rust injuries on winter Wheat as a function of cropping practices, soil, weather, and field environment.

Marie-Hélène Robin^{1, 2}, Adèle Magnard², Irène Felix³, Bernard Rolland⁴, Axel Olivier⁵, Marie-Odile Bancal⁶, Yvan Sache⁷, Marc Délos⁸, Jean-Noël Aubertot^{2, 9}

¹ Université Toulouse, INPT El Purpan, F-31076 Toulouse, France

² INRA, UMR 1248 AGIR, F-31320 Castanet-Tolosan, France

³ ARVALIS Institut du végétal, Service Agronomie Economie Environnement
F-18570 Le Subdray, France

⁴ INRA, UMRUMR APBV, F- 35653 Le Rheu, France

⁵InVivo AgroSolutions Pool Technique Santé Végétale et Agronomie - Grandes Cultures, France

⁶ UMR EGC, 78850 Thiverval-Grignon, France

⁷ INRA, unité BIOGERCCP, 78850 Thiverval-Grignon, France

⁸ DRAAF- SRAI, 31074 TOULOUSE cedex, France

⁹ Université Toulouse, INPT, UMR AGIR, F-31029 Toulouse, France

Abstract

IPSIM (Injury Profile SIMulator) is a generic modelling framework. It aims at predicting a crop injury profile as a function of cropping practices, soil, weather and field environment. The IPSIM modelling approach consists of designing a model with an aggregative hierarchical tree of attributes. This method was used successfully to develop IPSIM-Wheat-Brown Rust, a model that predicts Brown Rust severity, an important foliar disease caused by *Puccinia triticina*, as a function of cropping practices, soil, climate, and field environment. This paper briefly presents the pathogen life cycle, the method used to develop IPSIM-Wheat-Brown Rust using the IPSIM modelling framework, simulation examples, an evaluation of the predictive quality of the model with a large dataset (1045 observed site-years) and a discussion on the limitations and the benefits of the approach. The model proved to have a good predictive quality: 88% of the simulated classes encompassed the observed values and 95% had at most a difference of one class only). It can now be used to help design strategies to control Brown Rust on Wheat. It will be used as a sub-model for IPSIM-Wheat, as model that will predict injury profile on Wheat as a function of cropping practices and some components of the production situation.

Key words: Cropping practices, production situation, Integrated Pest Management, foliar diseases, *Triticum aestivum*, *Puccinia triticina*.

1. Introduction

Leaf Rust, caused by *Puccinia triticina* Eriks., is the most common Rust disease of Wheat (*Triticum aestivum* L.). Worldwide, *P. triticina* can be found in most ecoregions where Wheat is grown and is now as recognised a prevalent pathogen in Wheat production, causing significant yield losses over large geographical areas (Roelfs et al., 1992; Kolmer, 2005). Yield losses in Wheat from *P. triticina* infections usually result from a decrease of kernel number per spikelet and lower kernel mass (Huerta-Espino et al., 2011). In 2007, leaf Rust caused a 14% loss in winter Wheat yields in Kansas (USA), the leading Wheat-producing state in the USA (Bolton et al., 2008). At the end of the 20th century, it was one of the most damaging foliar diseases in Europe (Goyeau and Lannou, 2011).

The main host of *P. triticina* is common bread Wheat, but the disease also occurs on durum Wheat (wild or domesticated), emmer Wheat and triticale (Anikster et al., 1997; Bolton et al., 2008). Due to wide genetic variability and a nearly discrete host range (Goyeau et al., 2006; Ordonez et al., 2007), isolates of *P. triticina* that occur on durum Wheat can probably be considered as different races from leaf Rust on common Wheat.

The fungus is an obligate parasite capable of producing infectious urediniospores as long as infected leaf tissues remain alive. Urediniospores can be wind-dispersed and infect host plants hundreds of kilometres from their source plant, which can result in Wheat leaf Rust epidemics on a continental scale (Bolton et al., 2008).

The main strategies for leaf Rust control rely on the use of cultivars with genetic resistance and the application of fungicides to the crop. Genetic resistance is the most economical and preferable method to reduce losses from leaf Rust, and 60 leaf Rust resistance (Lr) genes have been designated in Wheat (McIntosh et al., 2012). However, the genetic resistance of Wheat to *P. triticina* is not durable due to the high genetic adaptability of its populations, resulting in the occurrence of new virulent races in different continents (Kolmer, 2005; Goyeau et al., 2006; McCallum et al., 2007; German et al., 2009; Goyeau and Lannou, 2011; Goyeau et al., 2012). Hence chemical control can be valuable for situations when new races of leaf Rust develop and new resistant cultivars are not available. The possible reduction of *P. triticina* susceptibility to fungicides was recently reported by Arduim (Arduim, 2012) but good

field performance of DMIs against rust has been maintained by the FRAC (Fungicide resistance Action Committee, 2011).

Finally, growing concerns about the impact of pesticides on the environment and human health has led to attempts to limit pesticide use and most governments of developed countries have launched national action plans to reduce their use and to support and develop Integrated Pest Management, IPM (Birch et al., 2011). It appears therefore necessary to add and combine cultural methods (i.e. the adaptation of cropping practices not directly related to crop protection) to genetic and chemical control methods to design IPM strategies to control the disease along with other major pests (plant pathogens, Weeds and animal pests) on Wheat.

P.triticina is an airborne pathogen and is slightly endocyclic, as defined by (Aubertot et Robin, 2013). The main control methods against this pathogen are (Mishra et al., 1994; Robert et al., 2002; Anderson et Soper, 2003; Cox et al., 2004; Robert et al., 2004a; Bolton et al., 2008; Goyeau et Lannou, 2011; Papaix et al., 2011): i) mitigation through crop status (i.e. use of resistant cultivar alone or in a cultivar mixture, a late sowing date, limited nitrogen fertilisation); ii) the management of primary inoculum sources at the territory level (i.e. spatial distribution of Wheat fields, management of Wheat volunteers); iii) use of fungicides (Samborski, 1985; Roelfs et al., 1992).

IPM strategies, based on these alternatives and complementary methods with incomplete efficacies, have to be developed, adapted and applied to a wide range of production situations. Production situation is defined as the physical, chemical and biological components, except for the crop, of a given field (or agroecosystem) and its environment, as well as socio-economic drivers that affect farmer's decisions. In this definition, the term "environment" refers to the landscape and the associated factors, that can directly or indirectly influence the field concerned (Aubertot et Robin, 2013).

However, it is extremely difficult to describe the entirety of the Cropping Practices*Production Situation system because of the tremendous number of interactions. Modelling is therefore necessary to cope with such a level of complexity.

However, few epidemiological models integrate the effects of cultural (Aubertot, 2005) because of the difficulty in describing their numerous effects on the

agroecosystem in question. Thus, different models have been developed to represent Brown Rust dynamics, often to help decision making with regards to fungicide applications, and are generally based on meteorological variables. Thus, Wheat Rust epidemics have been successfully predicted using mechanistic (Benizri, 1992) or statistical approaches (Eversmeyer, 1970; Burleigh, 1972; K. V. Subba Rao, 1990; Subba Rao, 1990; Daamen, 1991; Rocque, 1991; Benizri, 1992; Eversmeyer et Kramer, 1996; Rossi et al., 1996; Rossi et al., 1997; Eversmeyer and Kramer, 1998; Moschini and Perez, 1999; Audsley et al., 2005; Rader et al., 2007; Thepot et Gouache, 2009; El-Jarroudi M., 2010). Among these models, very few take into account both meteorological and agronomic factors. Only the impacts of sowing date or genetic resistance were considered in a few models (Benizri, 1992; Moschini et Perez, 1999; Audsley et al., 2005). Other models represent the impact of Brown Rust injuries on Wheat growth (i.e. damage mechanism, (Seck et al., 1988; Moschini et Perez, 1999; Robert et al., 2004b). There is therefore an urgent need for a model to predict the effects of the most influential cropping practices on Brown Rust in a given production situation.

The modelling framework IPSIM (Injury Profile SIMulator) has been developed to help design models predicting Injury Profiles as a function of cropping practices and production situation (Aubertot et Robin, 2013). As a proof of concept, the model IPSIM-Wheat-Eyespot has been developed and its predictive quality assessed (Robin et al., 2013). The production situation is defined by the physical, chemical and biological components, except for the crop, of a given field (or agroecosystem) and its environment, as well as socio-economic drivers that affect farmers' decisions (Aubertot et Robin, 2013).

This paper presents the method used to develop IPSIM-Wheat-Brown Rust using the IPSIM modelling framework (Aubertot et Robin, 2013), an evaluation of its predictive quality, and a discussion of the limitations and benefits of the model.

2. Materials and methods

2.1. Design of IPSIM-Wheat-Brown Rust

2.1.1. General Approach

IPSIM-Wheat-Brown Rust is based on the DEX method, and was implemented with the software DEXi (Bohanec, 2009) based on DEX methodology (Žnidaršič et al., 2008). DEX is a method for qualitative hierarchical multi-attribute decision modelling and support, based on a breakdown, clear and structured, of a complex decision problem into smaller and simpler sub-problems, characterised by indicators (or attributes) that are organised hierarchically into a decision tree. These attributes are characterised by their name, a description and a scale. DEXi is generally used to evaluate and analyse decision problems, as a Decision Support Tool (e.g. Sadok et al., 2009; Griffiths et al., 2010). However, the DEX method has been used here in an original way to model complex agroecosystems. IPSIM-Wheat-Brown Rust is therefore a hierarchical and qualitative model, allowing the prediction of Brown Rust injury according to various factors in interaction. IPSIM-Wheat-Brown Rust has the following features (Bohanec et al., 2003):

- i) Processes are hierarchically organised into a tree of attributes that constitutes the structure of the model (**Figure 23**).
- ii) Terminal attributes of the tree (i.e. leaves or *basic attributes*) are input variables of the model and must be specified by users; the "trunk" of the tree (i.e. the *final aggregated attribute*) is the main model output variable (final Brown Rust severity on Wheat); internal nodes are called *aggregated attributes* and constitute internal nodes which represent intermediate output of the assessment as a function of all attributes located below it.
- iii) All model attributes are qualitative variables rather than quantitative variables. They take only discrete, linguistic variables, usually represented by words rather than numbers: e.g. "Cultivar susceptibility", "level of N fertilisation». Scales, range of symbolic values, ordered (such as "low" or "high") or nominal (such as the name of the preceding crop), are assigned to each attribute.

iv) The aggregation is performed via sets of qualitative “if-then” decision rules (e.g. “if attribute A is low and attribute B is high then the aggregated attribute C is medium”, attributes A and B being located one level below C in the hierarchy). In DEXi, the rules corresponding to each aggregated attribute are gathered in a tabular form that corresponds to a “utility function” that will be denoted here as “aggregative tables”.

Based on the values of basic attributes, the model calculates the values of all aggregated attributes and the final attribute, *i.e.* Brown Rust severity on Wheat.

IPSIM-Wheat-Brown Rust was designed in 3 steps (Bohanec et al., 2003): (1) identification and organisation of the attributes, (2) definition of attribute scales, and (3) definition of aggregative tables.

Attribute tree

Attribute	Description
Final severity of brown rust	Combined effects of soil & climate, cropping practices, and the rest of the territory on the disease (% of diseased area on the leaf flag)
Effect of cropping practices	Impact of cropping practices on brown rust dynamics
Primary inoculum management	Combined effects of the preceding crop, tillage, and climate during fallow period on volunteer destruction
Preceding crop	Preceding crop: host (wheat), non-host (non wheat)
Rainfall amount during the fallow period	Rainfall amount during the fallow period (summer and autumn) allowing volunteer emergence and efficient volunteer destruction
Soil preparation	Soil preparation after harvest of the preceding crop: ploughing, superficial tillage, or weeding in order to destroy wheat volunteers
Escape: effects of the sowing date	Earliness of the sowing date as a function of the considered region
Mitigation through crop status	Combined effects of cultivar, N fertilisation, sowing rate on brown rust mitigation through crop status
Cultivar choice	Cultivar susceptibility
Level of N fertilisation	Level of N fertilisation as a function of the preceding crop and expected yield
Sowing rate	Number of seeds per m ₂
Chemical control efficacy	0 or 1 fungicide treatment
Fungicide T2 efficacy	Fungicide efficacy according to Arvalis
number of fungicide treatment further T2	number of fungicide treatment (T1 or T3) further in the program
Effects of soil and climate	Effects of soil and climate on Brown rust epidemics
Spring climate	Effect of climate on spring on brown rust dynamics
Interactions with the rest of the territory	Effects of field surroundings
Primary inoculum sources	Proportion of wheat at the landscape level (and wheat volunteer density)

Figure 23 : Hierarchical structure of IPSIM-Wheat-Brown Rust. Bold and non-bold terms represent aggregated and basic attributes, respectively.

2.1.2. Identification and Organisation of Attributes

IPSIM-Wheat-Brown Rust aims at predicting the severity of Brown Rust on Wheat in a given field according to a set of input variables describing the cropping practices and the production situation. The spatial scale addressed by the model is the field under the influence of its direct environment. The temporal scale addressed by the model is the Wheat growing season, although some input variables encompass the

crop sequence (up to the preceding crop). IPSIM-Wheat-Brown Rust is a static deterministic model.

The hierarchical structure presented in **Figure 23** represents the breakdown of factors affecting Brown Rust final severity into specific explanatory variables, represented by lower-level attributes. This figure represents the adaptation to Brown Rust of the model structure presented in **Figure 8** by Aubertot et Robin (2013). All the attributes have been chosen using the knowledge available in the international literature and summarised in **Annexe 13**, plus expert knowledge when needed.

In all, IPSIM-Wheat-Brown Rust has 16 attributes, of which 10 are basic (i.e. input variables) and 6 aggregated. The 10 basic attributes are presented as the terminal leaves of the tree and their levels are aggregated into higher levels according to aggregative tables. The aggregated attributes represent state variables among which the output variable of IPSIM-Wheat-Brown Rust the final severity of the disease. They are determined by lower-level basic attributes (Bohanec et al., 2007a). The output of IPSIM-Wheat-Brown Rust is represented by the attribute "Final severity of Brown Rust" (Brown Rust severity at the "milky grain", stage 7: development of fruit on the BBCH scale (Lancashire et al., 1991) which is determined by three main factors: cropping practices, weather and the environment of the considered field in terms of proportion of Wheat fields in the landscape. This is reflected by the hierarchical structure of the model, which consists of three sub-trees of attributes (Figure 23) split into one main part and two smaller ones. The main sub-tree "Effect of cropping practices" illustrates the complexity of the effects of cropping practices and the need to consider a combination of practices in order to evaluate the final Brown Rust severity. It uses indicators based on tactical (with a short time-frame) or strategic decisions (with a longer time-frame ; Kropff et al., 1995). These decisions can affect the agroecosystem at several stages.

- i) *P. triticina* is an obligate fungus entirely dependent on living plant tissue for its growth and propagation (Bolton et al., 2008). The impact of the crop sequence on the pathogen is poorly described in the literature. However, the cumulative effects of the crop sequence on the disease in a given field are presumably less important than for diseases caused by pathogens that can survive on infected stubble. Leaf Rust infections pass the summer on Wheat volunteers (bread Wheat, durum Wheat, or

triticale) which serve as reservoirs of inoculum for the autumn-planted winter Wheat (Bolton et al., 2008). Seeds of Wheat can survive in soil for at least 2 years (Anderson et Soper, 2003). Thus, longer intervals between Wheat crops reduce Wheat volunteer density (Anderson et Soper, 2003). Moreover, Wheat volunteers are generally favoured by reduced tillage as compared to conventional tillage with ploughing (Ogg et Parker, 1989; Derksen et al., 1993; Pickett, 1993; Blackshaw et al., 2001). Wheat volunteer emergence is highly variable due to numerous factors, including genotypic, environmental (seedbed structure and humidity; Dürr et al, 2001), and agronomic factors such as harvesting operations, crop sequence, tillage, sowing date or nitrogen management. This variability makes it difficult to predict Wheat volunteer density (Anderson et Soper, 2003). The pathogen survival depends therefore on a “green bridge” (on self-sown Wheat volunteers) after harvest and before sowing of Wheat at the landscape level (Roelfs et al., 1992). Brown Rust epidemics are therefore probably less influenced by the interaction between crop sequence and tillage at the field level than by the spatial distribution and the proportion of Wheat at the landscape level. In addition, Brown Rust passing the summer as mycelial or uredinial infections depend on environmental conditions: a great reduction in viability when urediniospores were exposed to high temperatures (>30°C) has been reported by several authors (Hassan et al., 1986; Roelfs et al., 1992; Eversmeyer et Kramer, 1994; Vallavieille-Pope et al., 1995). Insufficient rain or abnormally high temperatures may prevent establishment of Wheat volunteers after harvest, which prevents survival of *P. triticina* inocula from the previous crop (Eversmeyer et Kramer, 2000). Consequently, drastic reductions in pathogen populations will follow severe summer droughts that kill “green bridge” volunteers. Epidemics of this obligate pathogen therefore depend partly on summer weather sequences over more than one season (West et al., 2012). Nevertheless, urediniospores can be wind-dispersed and infect host plants hundreds of kilometres away from their source plant (Bolton et al., 2008). This exogenous (or airborne) inoculum is a major source of inoculum in areas where a host is absent

or where the environment during part of the year is too severe for pathogen survival (Roelfs et al., 1992). However, the fields neighbouring a field with infected Wheat volunteers are certainly more susceptible to primary infections than those away from any primary inoculum sources. Most epidemics are the result of endogenous (or local) inoculum (Samborski, 2005; Zadoks, 1985; Roelfs et al., 1992). Thus the destruction of all Wheat volunteers over a large area would therefore significantly reduce the survival of endogenous inocula and possibly reduce yield losses due to severe epidemics (Eversmeyer et Kramer, 2000). Tillage and seedbed preparations (such as ploughing and to a lesser extent surface tillage), and mechanical or chemical weeding aimed at destroying Wheat volunteers and at the same time at removing “the green bridge”, will help manage and reduce primary endogenous inocula of *P. triticina* (Ogg et Parker, 1989; Roelfs et al., 1992; Bailey et al., 2001).

ii) Action by escape consists of shifting periods of highest crop susceptibility away from the main periods of pathogen primary inoculum production. This is achieved with late sowing dates. On the other hand, early sowings increase the probability of autumn contaminations through primary infection due to longer time available for Brown Rust to develop and to infect leaves. Indeed, Brown Rust has often been reported to be more severe in early sown crops and Rust incidence generally decreases with sowing delay (Mishra et al., 1994; Moschini et Perez, 1999; Eversmeyer et Kramer, 2000; Bancal , 2010).

iii) During crop growth, some cropping practices can mitigate infections through crop status by creating less favourable conditions for *P. triticina* development.

Genetic resistance is the most economically efficient and biologically effective control method of Brown Rust (Kolmer, 1996; German et al., 2009). Until the present, 66 leaf Rust resistance genes (designated *Lr1-Lr66*) have been identified and mapped in Wheat (McIntosh, 2013; Goyeau et Lannou, 2011). But new races of *P. triticina* regularly emerge (e.g. 40-60 new races are identified in north-America every year), and

are wind dispersed over thousands of kilometres across continents and oceans. They can be introduced into different Wheat-producing countries with serious consequences, such as a reduction in the number of effective Rust-resistance genes available (Kolmer, 2005; Goyeau et Lannou, 2011; Goyeau et al., 2012). This introduction of new Brown Rust races or virulent phenotypes, caused by migration of spores, poses a great challenge for breeders in their efforts to achieve durable resistance to the cereal Rusts (Ordonez et Kolmer, 2007). The durability of cultivar resistance can be enhanced by (i) providing a diversity of resistance genes to slow the build-up of virulent races; (ii) using non-specific or partial resistance (Goyeau et al., 2009; Azzimonti, 2013) (iii) diversifying the landscape composition (in terms of host varieties frequencies) and (iv) combining cultural, biological, physical or chemical methods of control (Eversmeyer et Kramer, 2000; Aubertot et al, 2006; Papaix et al., 2011; Azzimonti, 2013).

It is generally agreed that application of nitrogen fertilisers may influence plant health by altering the susceptibility to plant pathogens (Agrios, 1997). A high level of nitrogen favours Brown Rust by increasing leaf area and in creating a dense canopy and a humid microclimate. For instance, it has been reported that increasing N rates (from 67 to 134 kg/ha) increased leaf Rust severity (from 5.8 to 9.4%; Mascagni et al., 1997). On the other hand nitrogen deficiency tends to delay the epidemic development of most foliar diseases (e.g. Aubertot et al., 2004) such as Brown Rust (de Vallavieille-Pope, 2000). Robert et al. suggested that when the nitrogen status of the host is restricted, spore production per lesion is reduced (Robert et al., 2002; Robert et al., 2004a).

Low plant density can limit pathogen development through several mechanisms, such as restricting contact between plant organs and lowering humidity within the canopy (Burdon et Chilvers, 1982). The effect of sowing density on Brown Rust dynamics is poorly described and unclear in the literature. Some authors found that sowing density rarely significantly influences Brown Rust severity, probably because of

compensation caused by increased tillering at low sowing densities (Chester, 1946). Others suggested that microclimatic changes resulting from higher plant densities favoured disease development. This partly explains the year-to-year variability of epidemic durations and severities (Pfleeger et Mundt, 1998).

The severity of leaf Rust is lower in cultivar mixtures as compared to single cultivar crops. Disease severity on the susceptible cultivar decreases as its proportion decreases in a mixture (Mahmood et al., 1991; Vilichmeller, 1992; Lannou et al., 1994a; Lannou et al., 1994b; Jackson et Wennig, 1997; Pfleeger et Mundt, 1998; Mille et Vallavieille-Pope, 2001; Cox et al., 2004). The effect of cultivar mixtures could be explained in two ways: i) the presence of resistant cultivars act as physical barriers to inoculum dispersal and ii) differentially susceptible cultivars help control disease by allowing induced resistance to occur (Pfleeger et Mundt, 1998).

iv) Lastly, a fall-back solution (fungicide applications against a fungi complex) can be used when other control methods are not sufficient. Fungicides are an effective control method for many Rust diseases. Although the use of resistant cultivars should be the corner stone of IPM strategies against Brown Rust, chemical control can be useful for situations where genetic resistance is not commercially available, or where they do not reduce injury to economically acceptable levels because of adapted pathogen populations (Samborski, 2005; German et al., 2009). The two chemical fungicide classes, Quinone outside Inhibitor (QoI) and the DeMethylation Inhibitor (DMI) achieve excellent control (70 to 97%), especially as Brown Rust has not developed resistance yet (Arvalis, 2013 c).

The two other sub-trees of ISPSIM-Wheat-Brown Rust describe the weather and field surroundings. Of these two sub-trees, weather conditions are the main factors affecting Brown Rust development (Samborski, 1985; Roelfs, 1989; de Vallavieille-Pope et al., 2000; Eversmeyer et Kramer, 2000; Sache et al., 2000; Bolton et al., 2008). Nevertheless, the effect of the landscape structure, especially the proportion

of Wheat area in the micro-region of interest, can influence Brown Rust epidemics. Indeed, Brown Rust, like most airborne diseases, produces a large number of spores ready to be removed from host plants and transported over a few centimetres (to neighbouring plants of the same field) to thousands of kilometres (Sache, 2000; Bolton et al., 2008). It is therefore difficult to evaluate quantitatively the risk of contamination of a given wheat field due to the tremendous potential sources of primary inoculum. However, qualitatively, higher densities of wheat volunteers in the surrounding fields and a higher proportion of wheat fields in the micro-region (since the disease is polycyclic) will make the deposit of exogenous inocula in given Wheat more likely to happen. Moreover, the landscape varietal composition influences the resistance level of the most-grown wheat varieties by altering the structure of the pathogen populations (Papaix et al., 2011).

To conclude, epidemics of Brown Rust are more influenced by the environmental conditions favourable to their development than by primary inoculum management (Charles, 2011).

2.1.3. Definition of the Attribute Scales

The second step in the design of a DEXi model is the choice of ordinal or nominal scales for basic and aggregated attributes. Sets of discrete values were defined for all attributes of the model and described by symbolic value scales defined by words. These values were defined according to the knowledge available in the international literature and some expertise when needed. IPSIM-Wheat-Brown Rust uses at most a four-grade value scale (i.e. "Unfavourable", "Moderately favourable", "Favourable", and "Very favourable" "Unfavourable", "Moderately favourable", "Favourable", "Very favourable" for the aggregated and basic attributes. This scale refers to the disease: the value "Favourable" means that the attribute is favourable to the development of the disease and therefore potentially detrimental to the crop.

Some basic attributes can be specified using quantitative variables, which are then translated into ordinal variables using technical publications, experimental references or expertise. This translation takes into account the regional context. For example, a sowing date classified as "Early" in the south of France might be classified as

"Normal" in northern France. This classification actually depends on the sowing date distribution in the region concerned.

Other attributes are directly estimated with qualitative variables. For instance, the indicators "soil preparation" or "preceding crop" are nominal variables. The level of cultivar resistance has been described using the official list provided by the French National Seed Station (Groupe d'Etude et de contrôle des Variétés et des Semences; <http://cat.geves.info/Page/ListeNationale>) and published by Arvalis-Institut du végétal <http://www.fiches.arvalis-infos.fr/>. In this list, cultivars are rated for their susceptibility to Brown Rust on a 1-9 scale, from very susceptible to resistant. Sometimes, a two-value scale is sufficient to represent the value of an attribute (e.g. the preceding crop is a host or non-host). However, other attributes usually need a three-value scale to describe the diversity of cropping practices or the field environment (e.g. the sowing date attribute requires three grades to describe farmers' practices: the sowing date can be early, normal or late). The initial quantitative attributes (e.g. "level of N fertilisation" can be equivalent to 180 kg) are translated into ordinal values (e.g. "high, normal and low") using threshold values defined using regional technical references.

For the weather attribute, a three-value scale ("Unfavourable"; "Favourable"; "Very favourable") was defined using knowledge from weather-based epidemiological models (Rader et al., 2007; Caubel et al., 2012) and the database SAFRAN (MétéoFrance).

All the scales in **Figure 24** are ordered from values favourable to the disease (i.e. detrimental to the crop) on the left-hand side to values detrimental to the disease on the right-hand side (i.e. favourable to the crop). In the DEXi software, this difference is clearly visible because, by convention, values beneficial to the user are coloured in green, detrimental in red, and neutral in black.

Attribute	Scale
Final severity of brown rust	80-100; 60-80; 40-60; 20-40; 0-20
Effect of cropping practices	Favourable; Moderately favourable; Unfavourable
Primary inoculum management	Favourable; Unfavourable
Preceding crop	Host; Non host
Rainfall amount during the fallow period	Favourable; Unfavourable
Soil preparation	Non destruction of volunteers; Destruction of volunteers
Escape: effects of the sowing date	Early sowing; Normal sowing date; Late sowing
Mitigation through crop status	Very favourable; Favourable; Moderately favourable; Unfavourable
Cultivar choice	Very susceptible to susceptible; Moderately susceptible; Quite to very resistant
Level of N fertilisation	Excess level; Balanced level
Sowing rate	High; Normal; Low
Chemical control efficacy	Very good control efficacy; Good control efficacy; Average control efficacy; Low control efficacy
Fungicide T2 efficacy	good efficacy; Average efficacy; low efficacy or 0 treatment
number of fungicide treatment further T2	0; 1; 2
Effects of soil and climate	Very favourable; Favourable; Unfavourable
Spring climate	Very favourable; Favourable; Unfavourable
Interactions with the rest of the territory	Favourable; Neutral
Primary inoculum sources	Very important; Normal

Figure 24 : Attribute scales of IPSIM-Wheat-Brown Rust. All the scales are ordered from values favourable to Brown Rust (i.e. detrimental to the crop) on the left-hand side to values unfavourable to Brown Rust on the right-hand side (i.e. beneficial to the crop). In the DEXi software, this difference is clearly visible because, by convention, values beneficial to the user are coloured in green, detrimental in red, and neutral in black.

2.1.4. Definition of Aggregative tables

The third step in the design of a DEXi model is the choice of aggregative tables that define attribute aggregation throughout the attribute tree. The rules that correspond to a single aggregated attribute are gathered together and conveniently represented in tabular form. In this way, each aggregative table defines a mapping of all value combinations of lower-level attributes into the values of the aggregate attribute. **Figure 25** shows the aggregative table that corresponds to the "mitigation through crop status" aggregated attribute and defines the value of this attribute for the 18 possible combinations of three cultivar choices, two levels of fertilisation and 3 sowing densities. For example, if the cultivar is quite to very resistant, the level of N fertilisation balanced and the sowing rate low, then the "mitigation through crop status" attribute will be unfavourable to Brown Rust (the final incidence will be decreased by this value). However, in this example, even if the sowing rate and the N application rate are both high, the "mitigation through crop status" attribute will contribute to decrease the final severity significantly because the "cultivar choice" attribute is much more influential than the two other attributes (**Figure 25**).

	Cultivar choice	Level of N fertilisation	Sowing rate	Mitigation through crop status
1	Very susceptible to susceptible	Excess level	High	Very favourable
2	Very susceptible to susceptible	Excess level	Normal	Very favourable
3	Very susceptible to susceptible	Excess level	Low	Very favourable
4	Very susceptible to susceptible	Balanced level	High	Very favourable
5	Very susceptible to susceptible	Balanced level	Normal	Very favourable
6	Very susceptible to susceptible	Balanced level	Low	Very favourable
7	Moderately susceptible	Excess level	High	Favourable
8	Moderately susceptible	Excess level	Normal	Favourable
9	Moderately susceptible	Excess level	Low	Moderately favourable
10	Moderately susceptible	Balanced level	High	Moderately favourable
11	Moderately susceptible	Balanced level	Normal	Moderately favourable
12	Moderately susceptible	Balanced level	Low	Moderately favourable
13	Quite to very resistant	Excess level	High	Unfavourable
14	Quite to very resistant	Excess level	Normal	Unfavourable
15	Quite to very resistant	Excess level	Low	Unfavourable
16	Quite to very resistant	Balanced level	High	Unfavourable
17	Quite to very resistant	Balanced level	Normal	Unfavourable
18	Quite to very resistant	Balanced level	Low	Unfavourable
Resulting weights (calculated by DEXi):				
	83%	12%	5%	

Figure 25 : Aggregative table for the "Mitigation through crop status" aggregated attribute. Aggregation rules (for the 18 possible combinations of 3 cultivar choices, 2 levels of fertilisation and 3 sowing rates) and the resulting weights for each input attribute.

The aggregative tables of IPSIM-Wheat-Brown Rust have been established using knowledge available in the international literature, plus expert knowledge, and are summarised in **Annexe 13**.

2.1.5. Attribute Weights

The influence of each basic and aggregated attribute on the value of the output variable can be characterised by weights. The higher the weight, the more important the attribute (Bohanec et al., 2007b). The relative importance of attributes is therefore expressed by weights resulting from the aggregative tables. For example, the attribute "mitigation through crop status" is determined at 83% by "cultivar choice", at 12% by "level of N fertilisation" and at 5% by "sowing rate" (**Figure 25**). These weights have been estimated from the rules by DEXi using a linear regression method (Bohanec, 2009).

2.1.6. Simulations with DEXi

The ordinal final attribute value (final severity of Brown Rust) is calculated by DEXi. The calculation consists in computing all aggregated attribute values according to: (i) the structure of the tree; (ii) a set of input variables (basic attribute values) defining a simulation unit; and (iii) the aggregative tables. An example of output results obtained for two simulation units is provided in **Figure 26**. They represent basic input attributes and aggregated attribute values for an organic Wheat field and a conventional Wheat field.

Option	Conventional field	Organic field
. Final severity of brown rust	20-40	0-20
. . Effect of cropping practices	Moderately favourable	Unfavourable
. . . Primary inoculum management	Favourable	Unfavourable
. . . . Preceding crop	Host	Non host
. . . . Rainfall amount during the fallow period	Favourable	Favourable
. . . . Soil preparation	Non destruction of volunteers	Destruction of volunteers
. . . Escape: effects of the sowing date	Early sowing	Late sowing
. . . Mitigation through crop status	Very favourable	Unfavourable
. . . . Cultivar choice	Very susceptible to susceptible	Quite to very resistant
. . . . Level of N fertilisation	Excess level	Balanced level
. . . . Sowing rate	Normal	High
. . . Chemical control efficacy	Good control efficacy	Low control efficacy
. . . . Fungicide T2 efficacy	good efficacy	low efficacy or 0 treatment
. . . . number of fungicide treatment further T2	0	0
. . Effects of soil and climate	Very favourable	Very favourable
. . . Spring climate	Very favourable	Very favourable
. . Interactions with the rest of the territory	Favourable	Favourable
. . . Primary inoculum sources	Very important	Very important

Figure 26 : Example of 2 simulations carried out with IPSIM-Wheat-Brown Rust (screenshot of the DEXi software).

2.2. Evaluation of the Predictive Quality of IPSIM-Wheat-Brown Rust

2.2.1. Description of the Dataset Used

Data representative of a wide range of weather conditions, Cropping Practices, and field environment are needed to assess the predictive quality of the model. A large dataset was therefore developed and a national survey was conducted to identify relevant data from various research and development institutes in France. The required datasets had to provide information for input attributes of IPSIM-Wheat-Brown Rust (description of Cropping Practices, weather and field environment) and its output (Brown Rust severity at the "milky grain", stage 7: development of fruit on BBCH scale (Lancashire et al., 1991). The dataset obtained is presented in **Table 14** and is described as below:

- It comprises results from a multi-environment experimental network (13 locations distributed over the main areas of Wheat production in France, studied in three seasons, between 1999 and 2013) comprising several combinations of cultivars and crop management (CM) systems (Loyce et al., 2008; Loyce et al., 2012). Four rule-based CM plans were defined, with a decrease in input level from CM1 (a high-input system) to CM4 (a low-input system) and cultivars were clustered into three groups, according to their scores for resistance to diseases in order to analyse the effects of interactions between genotype and management on diseases and on yield. These trials were not specific studies on Brown Rust diseases but were about major fungal Wheat diseases.
- Other data originated from the MicMac-Design Project (<http://www4.inra.fr/micmac-design>) which aims to design and assess cropping systems managed in low input farming, according to Integrated Crop Management (ICM) principles. In this project, different cropping systems have been tested since 2010 in two locations near Toulouse, France.
- Data from a cropping system experiment, "SGCI integrated systems for arable crops", carried out in Toulouse from 1995 to 2002 were used. Three systems representing realistic crop management choices for south western France were specified by their objectives and constraints: A: water and labour fully available, B:

input and labour reduction, and C: drastic input reductions (Nolot and Debaeke, 2003). The main Wheat pests were monitored on plots of agricultural size (about 1.5 hectare (Nolot and Debaeke, 2003).

- Other data come from an experiment to design environmental friendly dairy farming systems and agricultural practices (Coquil et al., 2009). Since 2005, two organic dairy systems have been prototyped. The evolution of the main diseases on the different crops of the studied cropping systems has been monitored.

- Data from “fungicide trials” undertaken by the members of In Vivo AgroSolutions, a subsidiary of Union InVivo, the first French group of cooperatives, were used. The goal of these trials, distributed throughout all the French Wheat production regions, is to assess the efficacy of fungicides and programmes on main Wheat disease (InVivo AgroSolutions, 2013).

- Finally, a survey in commercial fields was conducted in 2 regions of the south of France. Diseases, animal pests and Weeds have been monitored since 2011.

In all, 1045 site-years were used for the evaluation of the predictive quality of the model. They are composed of a large number of combinations of cropping practices and production situations (most of French cereal-growing regions over 15 years).

Studied impact on brown rust of cropping practices	Design	Year	Location	Site-year	References
Effects of crop management and cultivar on winter wheat diseases	Network of multifactorial field trials	1999-2013	13 locations	1026	(Loyce et al., 2008; Loyce et al., 2012)
design innovative prototypes of low-input cropping systems (Mic-Mac design)	Multifactorial field trials	2010-2013	2 locations (Toulouse)	23	http://www4.inra.fr/mic-mac-design
Design and evaluation of arable crops systems (SGCI)	Multifactorial field trials	1995-2002	1 location (Toulouse)	43	(Nolot and Debaeke, 2003)
Design organic environmental friendly dairy systems	Multifactorial field trials	1997-2011	1 location (Mirecourt)	11	(Coquil et al., 2009)
Cropping year fungicides trials	Monofactorial field trials	2007-2012	Several French regions	10	(InVivo AgroSolutions 2013)
Effects of cultural practices and climate on winter wheat diseases	Survey in commercial fields	2011-2013	2 French regions of the south of France (44 fields)	132	Magnard, 2012

Tableau 14 : Main features of the datasets used for the evaluation of the predictive quality of IPSIM-Wheat-Brown Rust.

2.2.2. Evaluation of the Predictive Quality of IPSIM-Wheat-Brown Rust

The evaluation consisted of comparing simulated and observed values. Since the model predicts classes of severity, observed Brown Rust severities at Wheat stage 7 (Lancashire et al., 1991) were transformed into observed severity classes using the same discretisation as the model (i.e. 0-20%, 20-40%, 40-60%, 60-80%, 80-100%). However, one might want to predict severities rather than classes of severity with the model. In order to test the predictive quality of IPSIM-Wheat-Brown Rust for severities, its output ordinal variable was transformed into a numerical value by replacing the predicted severity class by the centre of the class. The model was therefore evaluated in two ways: firstly, on its ability to predict severity classes, and secondly on its ability to predict Brown Rust severity.

Quality of Prediction for Severity Classes

The deviation of the model was characterised by calculating the number of classes of difference between observed and simulated classes. The distribution of simulated classes was displayed according to observed severity classes. This information was summarised by a multinomial distribution in 9 difference classes (from -4 to +4) since the model has 5 severity classes. The proportion of situations for which the model correctly predicted the observed severity class was taken as an indicator of the quality of prediction of the model.

Quality of Prediction for Severities

The predictive quality of IPSIM-Wheat-Brown Rust was characterised using three common statistical criteria (Polley and Clarkson, 1978; Wallach, 2006; Wallach et al., 2006): bias (Equation 1), Root Mean Square Error of Prediction (RMSEP, Equation 2), and efficiency (Equation 3).

$$Bias = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^{i=n} (Y_i^{obs} - Y_i^{sim}) \quad \text{Equation 1}$$

where n is the total number of situations considered, Y_i^{obs} the observed value for situation i , and Y_i^{sim} is the corresponding value simulated by the model. The bias measures the average difference between observed and simulated values. If the model underestimates the variable concerned, the bias is positive. Conversely, if the model overestimates the variable, the bias is negative.

$$RMSEP = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^{i=n} (Y_i^{obs} - Y_i^{sim})^2} \quad \text{Equation 2}$$

RMSEP quantifies the prediction error when the model parameters have not been estimated using the observations Y_i^{obs} used in the calculation of this criterion.

$$EF = 1 - \frac{\sum_{i=1}^{i=n} (Y_i^{obs} - Y_i^{sim})^2}{\sum_{i=1}^{i=n} (Y_i^{obs} - \bar{Y})^2} \quad \text{Equation 3}$$

where \bar{Y} is the mean of the observed data. Nash and Sutcliffe (Nash and Sutcliffe, 1970) defined the efficiency as a normalised statistic that determines the relative magnitude of the residual variance (“noise”) compared with the measured data variance (“information”). The efficiency defines the ability of a model to predict the value of a variable. It can range from $-\infty$ to 1. If the model perfectly predicts the observations, the efficiency is maximum and is equal to 1. Efficiency values below 0 indicate that the mean observed value is a better predictor than the simulated values, which indicate a poor predictive quality of the model. Values between 0 and 1 are generally viewed as acceptable levels of performance. The closer the model efficiency to 1, the better the fit between observed and simulated data (Wallach et al., 2006).

3. Results

3.1. Evaluation of the Quality of Prediction for Final Severity Classes

The high number of observed fields in the dataset (1045) permitted a reliable evaluation of the predictive quality of IPSIM-Wheat-Brown Rust. Residuals were

distributed around 0 (**Figure 27**), indicating that the predicted values are close to observations. The most (88%) of the simulated classes encompassed the observed values and 95% had at most a difference of one class only. **Figure 28** illustrates the distribution of class differences between observed and predicted final Brown Rust severities. The overall predictive quality of IPSIM-Wheat-Brown Rust was judged very fair, and very slightly biased. The predictive quality was good for the lowest class (the most frequent observed class in the dataset): 83% of the observed values between 0 and 20% were correctly simulated. The model slightly overestimated final severities for observed severities higher than 20%.

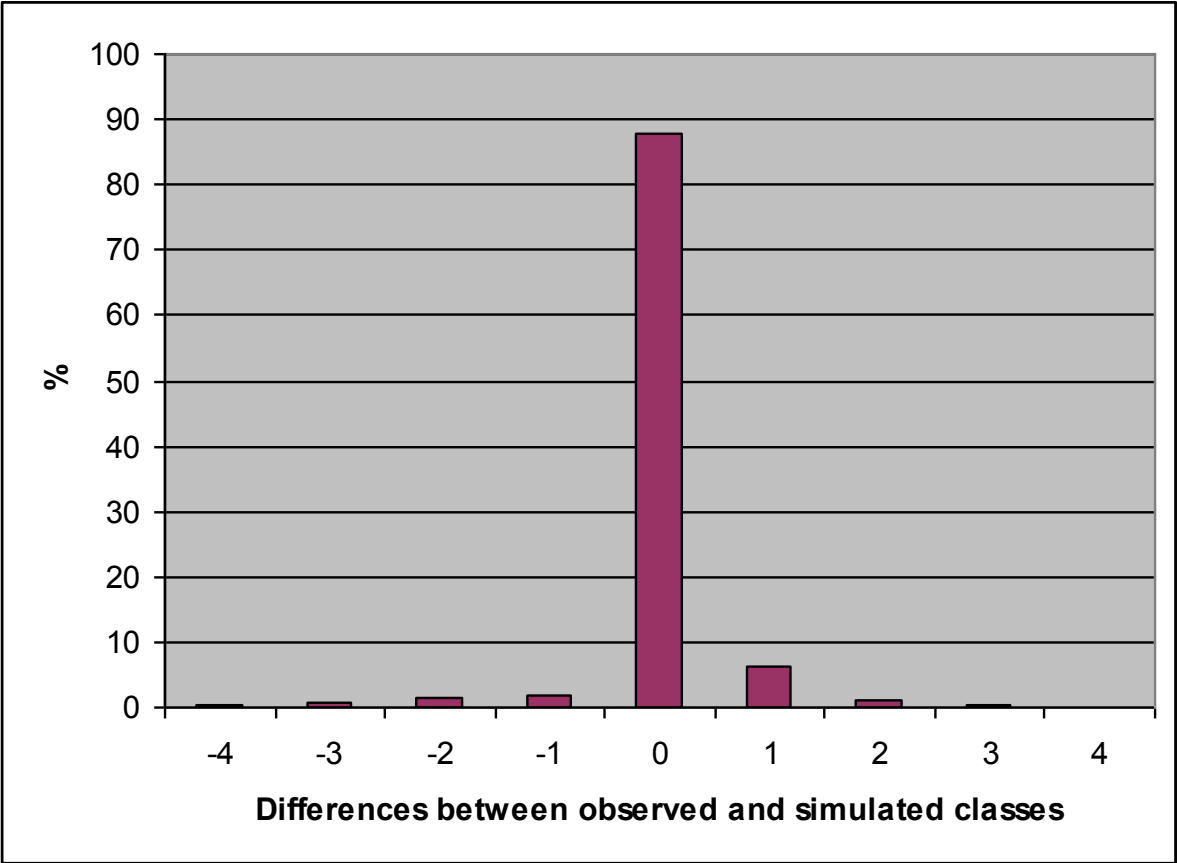


Figure 27 : Evaluation of the predictive quality of IPSIM-Wheat- Brown Rust. Residuals distribution: number of classes of difference between observed and simulated final Brown Rust classes (0-20%, 20-40%, 40-60%, 60-80%, 80-100%; 1045 fields, over 15 years and 19 French regions).

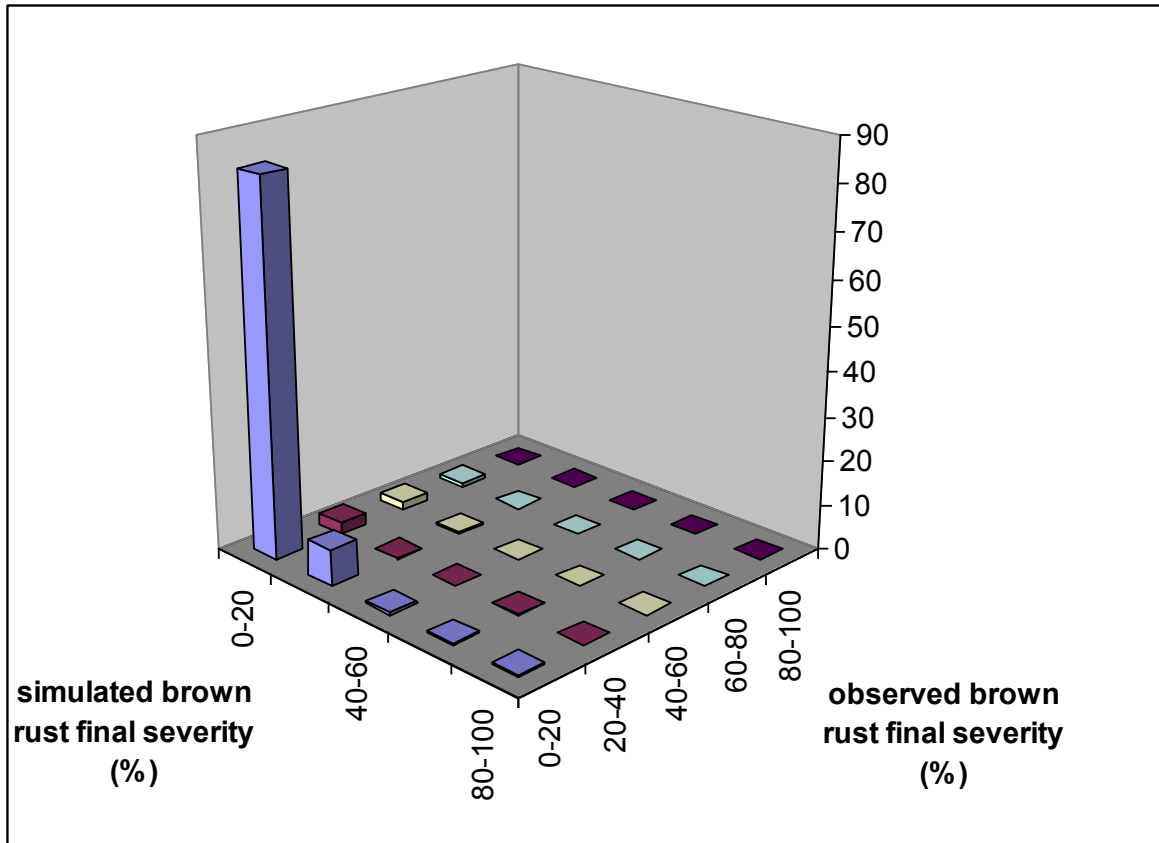


Figure 28 : Evaluation of the predictive quality of IPSIM-Wheat-Brown Rust. Distribution of class differences between observed and predicted final Brown Rust severities. (1045 fields, over 15 years and 19 French regions).

3.2. Evaluation of the Quality of Prediction for Final Incidence Values

For these 1045 output values, the overall predictive quality of the model was good. The model's predictive quality was quite acceptable as its efficiency value was low: 0.26. The Root Mean Square Error of Prediction error was quite high, 15%, since severities range between 0 and 100%. The bias was negative, -8.2 %, so the model slightly overestimated final Brown Rust incidences.

4. Discussion

4.1. Value and limitations of IPSIM-Wheat-Brown Rust

A Brown Rust epidemic occurs when a set of conditions relating to the disease tetrahedron of pathogen, host, environment and cropping practices is fulfilled (Zadoks et Schein, 1979). Cropping practices can affect pest and beneficial population dynamics and interfere with many of the interactions within communities. The modelling approach presented here help describe the complexity of the effects of cropping practices on the development of Brown Rust on wheat in various production situations.

Several studies have been conducted to understand these relationships, but only few led to the development of a simulation model (Benizri, 1992; Moschini et Perez, 1999; Audsley et al., 2005).

IPSIM-Wheat-Brown Rust offers new possibilities for the conception of innovative cropping systems less reliant on pesticides, since it is the first model to consider simultaneously the effects of weather, cropping practices and landscape and to take into account the diversity of interactions among these factors.

4.1.1. Conceptual scheme of IPSIM-Wheat-Brown Rust

The conceptual bases of IPSIM-Brown Rust are innovative in several ways:

- (i) It considers a time horizon longer than the cropping season (it includes the effect of the preceding crop),
- (ii) No other simulation model takes into account as many cropping practices affecting the disease development,
- (iii) Interactions between these practices as well as interactions and antagonistic or beneficial effects between practices and weather are also considered,
- (iv) Landscape interactions are taken into account (i.e. the proportion of wheat in the considered region), although this spatial representation is limited

as compared with the generic conceptual scheme of IPSIM (Aubertot et Robin, 2013)

- (v) The conceptual scheme of IPSIM-Wheat-Brown Rust does not take into account socio-economic drivers. However, this original conceptual model can help with the design of innovative cropping systems less susceptible to the disease. The information provided by IPSIM-Wheat-Brown Rust should be combined with other sources of information (references, other models, or expertise) in order to design new cropping systems, especially since damage (*i.e.* crop loss) caused by the disease are not represented and environmental and economic performances are not considered.

4.1.2. Identification of attributes and Aggregative tables

The qualitative nature of the DEXi method is well suited to the modelling of complex systems for which no high level of precision is required. The DEXi software tool offers a suitable environment for the organisation of available knowledge and a rapid development of IPSIM-Wheat-Brown Rust. The main strength of the IPSIM concept is to allow the handling of complexity in a simple way while taking into account a wide range of criteria (Aubertot et Robin, 2013). A first proof of concept for this innovative modelling approach in the field of crop protection for a single disease, Eyespot on Wheat, has been published (Robin et al., 2013).

A major innovation of this modelling concept is to be able to aggregate information of different natures and different units (e.g. preceding crop, a nominal variable and fertilisation level, a quantitative variable in seeds/m² or rainfall amount in mm day⁻¹). A main characteristic of the DEXi method is its ability to deal with qualitative variables (sometimes derived from quantitative variables); this can be seen as a loss of precision and sensitivity but this permit to represent a high level of complexity for interactions. The relative limited number of attributes and scales allows the representation of the complex underlying mechanisms to be kept as simple as possible. Increasing the number of scales could be a way to improve the accuracy of the hierarchical tree. However, it would result in more complicated aggregative tables

which would be less easy to complete by users. The choice of attributes and scales has been defined from literature, experimental data, and expert knowledge but sometimes there is a lack of literature or consensus on factors and the model cannot yet integrate them (e.g., the effect of cultivar mixtures on Brown Rust severity). The choice of the number of classes as well as the definition of thresholds is crucial for the overall model development. The use of thresholds (e.g. level of N fertilisation or sowing rate) leads to switch between classes abruptly when the variable is close to the threshold value. This can be a source of serious error for the cut-off values, particularly if the threshold discriminates between contradictory effects of an attribute (e.g. 100mm of rainfall during the fallow period differentiates between a favourable or unfavourable possible destruction of volunteers and consequently a favourable or unfavourable management of primary inoculum). To remedy this situation, fuzzy logic could be used to account for the uncertainty in the input variables by avoiding the knife-edge effect of a given class (Bockstaller et al., 2008). Instead of a threshold value which distinguishes a “Favourable” class from an “Unfavourable” class, a partial or fuzzy class is defined between them. In this approach, the estimation of attributes is continuous, leading to potentially higher sensitivity. However, it is less easy to use and weights attributed to each attribute are not as explicit as in DEXi models (Werf et Zimmer, 1998; Fragoulis et al., 2009; Pelzer et al., 2012)

Finally, some values of basic indicators are difficult to estimate because of their subjectivity or the difficulty for users to provide them; for example the presence of volunteers on the margins of a field. In this case, the attribute was therefore not taken into account. Moreover, all values of basic attributes have to be defined qualitatively, and some of them have to be derived from quantitative values. This can be tedious and sometimes doubtful (e.g. for the N fertilisation level, determining whether the quantity of N fertiliser is excessive or balanced can be difficult).

But since the early stages of development of IPSIM, it has been clear that precision was not an objective of the model (Aubertot et Robin, 2013). It appears more important to focus on accuracy rather than precision when modelling such a complex system and this was applied for modelling effects of cultural practices and weather on Brown Rust.

4.1.3. Predictive quality of IPSIM-Wheat-Brown Rust

The quality of the analysis of the IPSIM-Wheat-Brown Rust predictive quality not only depends on the model itself but also on the diversity of the data used. These data should represent a variety of soil, weather and cropping systems, but also of final incidences. The large dataset used in this study satisfied the three former conditions, but did not fully satisfy the latter. The observed final Brown Rust severities were generally quite low, so the predictive quality of the model has not been widely evaluated for high levels of severities.

Nevertheless, IPSIM-Wheat-Brown Rust seems to prove to fairly represent the variability of the 1045 “site-years” used to test its predictive quality.

4.2. Prospects

Further improvements can be added to the model in the future while maintaining the accuracy and simplicity of the model.

The IPSIM-Wheat-Brown Rust can easily be adapted to new or more precise challenges (e.g. crops diversification or climatic changes) or integrate future knowledge. For instance, it does not take into account the effects of combined crops or of cover crops on Brown Rust severity, since there is no consensus on these aspects in the literature at present.

In the future, the model could help to simulate changes in production situations by estimating effects of climatic changes on the disease. This issue is critical in Europe, as mild winters and dry springs will favour severe epidemics (Roche et al., 2008; Bancal, 2010; Caubel et al., 2012; West et al., 2012)

A major innovation of this modelling concept is to be a flexible and adaptable tool which can easily integrate local factors such as the local climate or a locally-used cultivar. This is even more possible given the rapidity, simplicity and practicality of the tool. However this requires total transparency with regards to its structure.

IPSIM-Wheat-Brown Rust is based on qualitative attributes and aggregative tables. In order to limit subjectivity when transforming quantitative variables into qualitative ones, users have to use a reference base adapted to the local features of cultural practices or production situations. Moreover, a sensitivity analysis could be

performed in order to analyse the effect of the different input variables on the intermediate and final outputs. The result of such an analysis can be used to identify the most influential input variables (Bockstaller et al., 2008). Great care should be paid to the processing of the most influential attributes. It can also help with adjusting aggregative tables to improve IPSIM-Wheat-Brown Rust's predictive quality.

IPSIM-Wheat-Brown Rust applies to a wide range of production situations. It can help design *ex-ante*, prototypes of innovative cropping systems less vulnerable to Brown Rust and less dependent on fungicide. It can also be used *ex-post* to assess existing common cropping systems, identify their performance in various production situations and therefore help farmers or experimenters to make decisions.

Its friendly and simple interface makes this tool an efficient support for communication, teaching and training for researchers, advisers, extension workers, teachers or even farmers. This can be a means to exchange knowledge and experience in an iterative assessment approach between model-makers and users, since the model offers the possibility of adjusting certain scales or aggregative rules.

The model presented in this paper deals with just one pest among a wide range of pests of wheat. However, it is necessary to consider the entirety of the major pests when designing cropping systems because farmers have to manage combinations of pest populations in interaction, leading to injury profiles. The injury profiles can in turn be responsible for quantitative or qualitative damage and ultimately economic losses. In addition to being a model specific to a given disease, IPSIM-Wheat-Brown Rust can also be seen as one of the sub-models of IPSIM-Wheat, a model that will predict complete injury profiles on wheat as a function of cropping practices and the production situation.

Chapitre 3. Autres modèles en construction

IPSIM-Wheat-Eyespot et IPSIM-Wheat-Brown Rust ont donc été les deux premiers sous-modèles développés et évalués selon le formalisme d'IPSIM. Ils constitueront des modules du modèle IPSIM-Wheat, modèle qui pourra à l'avenir prédire le profil de dégâts sur blé d'hiver en fonction des pratiques culturales et de l'environnement biotique et abiotique de la parcelle considérée.

Afin de représenter le profil complet des principaux dégâts sur blé d'hiver, il est donc nécessaire de concevoir l'ensemble des 12 sous-modèles, un pour chacun des bioagresseurs principaux du blé d'hiver en mobilisant la structure IPSIM décrite précédemment. Parmi ces 12 sous-modèles, 2 sont donc déjà construits et 6 sont en cours de développement et/ou d'évaluation :

- IPSIM-Wheat pour 4 maladies, le rhizoctone (IPSIM-Wheat-Sharp-Eyespot), la septoriose (IPSIM-Wheat-Septoria tritici), l'oïdium (IPSIM-Wheat-Powdery Mildew) et la fusariose (IPSIM-Wheat-Fusarium);

- IPSIM-Wheat pour 1 ravageur, le puceron des épis (IPSIM-Wheat-Aphids);

- IPSIM-Wheat pour les plantes adventices (IPSIM-Wheat-Weeds).

Dans cette prochaine partie, nous décrirons l'avancée du travail concernant ces différents sous-modèles (le sous-modèle Rhizoctone très proche de celui du piétin-verse ne sera pas décrit).

1. IPSIM-WHEAT-Septoria tritici

Afin de pouvoir construire le modèle avec ses attributs de base réunis en 3 attributs d'agrégation (les facteurs culturaux, le pédoclimat et l'environnement biologique) et de pouvoir ensuite hiérarchiser les facteurs favorisant la sévérité de la maladie, une recherche bibliographique a d'abord été conduite grâce à la littérature scientifique et technique et a été complétée à dire d'experts le cas échéant. Ce travail a ensuite permis de concevoir l'arbre hiérarchique selon la méthode IPSIM ainsi que les tables d'agrégation. La dernière phase de recueil de données et d'évaluation du modèle sera poursuivie à l'issue de cette thèse.

1.1. Epidémiologie de la maladie

Ces 30 dernières années, la septoriose du blé due à *Septoria tritici* (forme asexuée) *Mycosphaerella graminicola* (forme sexuée) (Suffert et al., 2011) a augmenté en sévérité dans les principales régions productrices de blé, entraînant des pertes de récolte importantes (El-Jarroudi et al., 2009). Des réductions de rendement sur le continent américain de 10 à plus de 60% ont été relevées (Simon et al., 2002) et en Europe du Nord, la septoriose et la rouille brune, les deux maladies principales du blé d'hiver peuvent engendrer, en cas de cultivars sensibles, à des pertes jusqu'à 60% (Cornish et al., 1990). Les dommages les plus graves sont observés lorsque les 2 dernières feuilles sont touchées par les taches nécrotiques (Thomas et al., 1989). Pour limiter ces pertes, le contrôle repose principalement à ce jour sur l'utilisation des cultivars peu sensibles et des traitements fongicides (Lovell et al., 2004).

Septoria tritici est un champignon hémi-biotrophe, car après une première phase biotrophe où l'infection se déroule sans détérioration des tissus hôtes, survient la phase nécrotrophe pendant laquelle les tissus colonisés commencent à mourir.

La conservation de la maladie peut se faire sous forme de mycélium, de pycnidiospores ou d'ascospores sur les débris de culture, les repousses ou autres plantes-hôtes et dans une moindre mesure sur les semences, (Suffert et Sache, 2011; Suffert et al., 2011). Les infections primaires sont causées par les ascospores, libérées dans l'air sur de grandes distances à l'automne à partir des périthèces formées sur les résidus de culture (Shaw et Royle, 1989) alors que les pycnidiospores transportés de feuille en feuille par splashing pendant les événements pluvieux constituent le mode de transmission le plus important pour la maladie pendant le cycle de culture au printemps (Lovell et al., 1997; Lovell et al., 2004).

Ainsi, au printemps, plusieurs cycles à pycnidiospores ont lieu sur les feuilles d'une plante de blé (maladie polycyclique). L'évolution de l'humidité relative vers la saturation permet l'exsudation des pycnidiospores à partir des pycnides. Les pycnidiospores sont adaptées à la dissémination à courte distance, typiquement d'une feuille âgée en bas de la plante vers une feuille jeune du haut de la même plante ou d'une plante voisine par les éclaboussures de pluie, lors des fortes précipitations. Après la pluie les pycnidiospores ont besoin d'humidité pour germer et

pénétrer dans la plante. Pour cela, il faut une humidité relative d'environ 98% au niveau de la feuille, mais l'eau liquide améliore la germination et la pénétration. La température doit être comprise entre 5°C et 37 °C l'optimum se trouve entre 20°C et 25°C. Ainsi, les conditions d'infection des tissus sont rarement limitantes (Gladders et al., 2001; Baccar et al., 2011) La maladie progresse ainsi par infections successives jusqu'à la feuille drapeau, d'où la qualification de la septoriose de maladie à gradient. Une propagation physique peut se produire en l'absence de fortes précipitations, notamment lorsque les feuilles se chevauchent avec les feuilles supérieures lors de leur émergence (Lovell et al., 1997).

1.2. Modèles disponibles sur *Septoria tritici*

La septoriose étant l'une des maladies les plus graves du blé dans toutes les zones de production, de nombreux travaux de modélisation ont été développés depuis de nombreuses années et des outils de prévision des contaminations et des risques sont aujourd'hui largement utilisés. Dès 1976, Rappilly développait déjà un modèle EPISEPT permettant la simulation d'une épidémie de *Septoria nodorum* sur blé.

Parmi les modèles disponibles, le modèle PRESEPT est un outil d'aide à la décision pour la lutte contre la septoriose qui prend en compte le climat (température minimales et maximales et pluviométrie) avant l'apparition de la maladie à différents stades de développement du blé. Il donne un indice de risque et aide l'agriculteur à choisir le moment optimal pour traiter sa culture afin d'éliminer ou de limiter ce risque phytosanitaire. Les données météorologiques et les parcelles où la maladie est quantifiée permettent une cartographie du risque de septoriose selon les régions (Rouzet and Murer, 1995). Ce modèle, basé sur le modèle d'Audsley (Audsley et al., 2005) a été très utilisé depuis les années 80 en France et ce jour il tend à être remplacé par Septo-Lis (Gouache et Couleaud, 2009).

Le modèle Septo-LIS permet d'établir le positionnement optimal des traitements fongicides et de quantifier l'impact de la septoriose sur la production (Gouache et Couleaud, 2009). Ce modèle décrit le développement de la septoriose en prenant en compte les données climatiques journalières (précipitations et températures) de la saison culturale et la date de semis. Il permet aussi de prévoir les risques de stress climatiques de fin de période. Un tel modèle participe à la construction d'un

programme optimisé et efficace de contrôle de la septoriose (Gouache et Couleaud, 2009).

Un autre modèle, Septo3D, a été développé pour représenter la progression d'une épidémie de septoriose dans le couvert végétal du blé. Il simule l'influence de l'architecture du couvert sur le développement de ces épidémies afin d'identifier les caractéristiques structurales induisant une épidémie de septoriose accrue. Ces caractéristiques sont la quantité de surface foliaire, la densité et la distance entre les feuilles saines et infestées (Robert et al., 2008; Robert et al., 2009).

En Belgique et au Luxembourg, on utilise le modèle PROCULTURE (Moreau et Maraite, 1999; El-Jarroudi et al., 2009; El Jarroudi et al., 2012). PROCULTURE commence à prédire l'évolution de la maladie à partir de la feuille F3. Sa particularité est d'avoir pour variable d'entrée, la contamination observée dans le champ à la date d'émergence de la feuille F3. D'après El Jarroudi (El Jarroudi et al., 2012), il semble que PROCULTURE surestime les contaminations en intensité. L'auteur impute cela au fait qu'il y ait un décalage entre la prédiction du modèle et la vitesse de développement de la maladie au champ.

En Allemagne, le modèle SEPTRI1 informe sur l'évolution de l'apparition de nouvelles infections en tenant compte de la sensibilité variétale (Erven et al., 2010).

Ces modèles ne prennent en compte que l'effet du climat et pour seule pratique culturale, la date de semis ou la sensibilité variétale, pour prédire le niveau de contamination et de risque dû à la septoriose, ce qui rend l'approche systémique très incomplète. IPSIM-Wheat-Septoria tritici se propose donc de prédire la sévérité finale de la septoriose en fonction des pratiques culturales, du pédoclimat et de l'environnement biologique.

1.3.Effets des pratiques culturales, du pédoclimat et de l'environnement de la parcelle, les 3 entrées du modèle IPSIM-Wheat-Septoria tritici

Après une recherche bibliographique approfondie, les facteurs influençant l'apparition de dégâts et la sévérité de la septoriose ont été caractérisés et seuls

ceux pour lesquels les connaissances étaient suffisantes et consensuelles ont été retenus comme variables d'entrée de notre modèle.

1.3.1. Effet des pratiques culturales

➤ Le précédent et antéprécédent

Une céréale à paille comme précédent et/ou antéprécédent augmente la sévérité due à la septoriose (Chevalier-Gerard et al., 1994). Pour contrôler la maladie, il est nécessaire d'insérer au moins deux années culturales sans blé entre les cultures de blé. Les épidémies de septoriose sont en effet largement réduites avec un intervalle de trois à cinq ans entre cultures de blé ou avec une rotation diversifiée en espèces (Suffert et Sache, 2011). Ce facteur très influant dans la dynamique de la septoriose sera largement pris en considération.

➤ Le travail du sol

Les blés sur blés combinés à une absence de labour favorisent la maladie. En effet, quand deux cultures de blé se succèdent, le labour diminue le risque d'épidémie (Sutton et Vyn, 1990) alors que le semis direct en positionnant les résidus en surface, augmente le risque de septoriose et induit souvent des dates de semis précoces augmentant encore la sensibilité du blé à la maladie. Même si la septoriose n'est pas considérée comme une maladie endocyclique, la présence de résidus pourrait participer à l'initiation de l'épidémie. Ainsi la sévérité de la septoriose est toujours plus importante lorsque le blé est semé sur un précédent céréale ou autre graminée (King, 1977).

Néanmoins, dans le cas où la culture précédant le blé est une culture non-hôte précédée par du blé, le labour ramène les résidus de récolte à la surface et peut donc induire une infection précoce de septoriose alors que les techniques simplifiées de travail du sol entraînent des épidémies moins importantes (Suffert et al., 2011). La maladie semble donc fortement dépendante du travail du sol et notre modèle en sera le reflet.

➤ La présence des repousses

Le rôle des repousses est mal connu. Elles peuvent, en hébergeant la maladie, contribuer à la formation de l'inoculum à l'automne sous forme d'ascospores (Suffert et Sache, 2011). Néanmoins, faute de littérature suffisante, nous ne considérerons pas ce facteur.

➤ La date de semis

S'agissant de la date de semis, les effets sont mieux documentés et perceptibles dans les essais. On constate généralement moins de septoriose sur les semis tardifs (Ben Mohamed et al., 2000; Gladders et al., 2001; Armour et al., 2004). Cela tient principalement au fait que les semis tardifs permettent aux premières feuilles (émergeant en hiver plutôt qu'en automne comparé aux semis précoces) d'échapper aux premières contaminations par ascospores. En effet, les pics d'émission des ascospores ont lieu généralement en automne (Shaw et Royle, 1989). Par ailleurs, le semis tardif conduit à une structure différente du couvert défavorable au développement de la septoriose : (i) à cause d'une réduction de la durée du cycle du blé, les plantes produisent moins de talles et de feuilles ce qui constitue moins de surface foliaire mise à la disposition du champignon ; (ii) les feuilles émergentes sont situées à une distance plus éloignée du sol et des premières feuilles contaminées ce qui réduit les chances de contaminations par les éclaboussures (Lovell *et al.*, 1997) ; (iii) l'effet le plus important est relié à la vitesse d'émission des feuilles qui est plus rapide pour les semis tardifs (Baccar, 2011) ce qui permet aux feuilles d'échapper à la maladie (Lovell *et al.*, 1997).

Le consensus est suffisant sur ce facteur pour que nous le prenions en compte dans le choix de nos attributs.

➤ Le choix variétal

Le choix variétal est le levier agronomique de contrôle de la septoriose le plus efficace. Il aura donc un poids important dans notre modèle. A un niveau de pression de septoriose élevé, les variétés résistantes sont plus productives que les variétés sensibles ; à faible pression, c'est le contraire (Mundt et al., 1995). Etant donné la forte interaction entre sévérité de la maladie et architecture de la plante, il est préférable d'utiliser des variétés à tige haute car des études réalisées, soit avec des variétés naines, soit avec des variétés ayant des statures différentes, ont montré que

les variétés à tiges courtes sont plus sujettes à la contamination par la septoriose (Lovell et al., 1997; Lovell et al., 2002). Une étude menée sur des variétés isogéniques différant uniquement par la présence/absence de barbes (Foulkes et al., 2006) a montré que les variétés barbues étaient plus sensibles à la septoriose. La résistance à la septoriose repose sur la présence de gènes Stb : seulement 18 gènes Stb sont identifiés aujourd'hui, à comparer aux 73, 89, 61 et 95 pour la rouille jaune, rouille brune, rouille noire et oïdium, respectivement (Ghaffary et al., 2011)

Quant aux résistances variétales, des solutions existent, y compris parmi les variétés les plus cultivées. Cependant, l'efficacité est partielle et la résistance, comme pour d'autres pathogènes, est sujette à contournement (Arvalis, 2013d).

➤ Les mélanges variétaux

Ils constituent une piste intéressante pour lutter contre la septoriose. Plusieurs études mettent en avant une diminution du risque de septoriose dans des mélanges variétaux ou des mélanges d'espèces blé-orge (Mille and Vallavieille-Pope, 2001; Mille et al., 2006; Saint-Jean et al., 2008; Gigot et al., 2011). Le meilleur compromis serait d'associer 3 à 5 variétés avec différents gènes de résistance, complémentaires agissant comme une résistance collective (Vallavieille-Pope et al., 2005). L'association variétale offre le même niveau de contrôle de la maladie qu'un fongicide car elle limite le transfert de spores dans le couvert (Gigot et al., 2009). Les variétés associées doivent cependant avoir la même hauteur de tige pour éviter l'effet d'ombrage et être de même précocité pour une croissance homogène (Vallavieille-Pope et al., 2005).

Cette technique, même si elle est encore peu répandue sera intégrée dans notre modèle au niveau du contrôle génétique.

➤ La fertilisation azotée

On observe également des effets controversés de l'azote. Plusieurs études soutiennent que les fortes doses de fertilisation azotée augmentent les symptômes et la sévérité de la septoriose (Tompkins *et al.*, 1993; Lovell *et al.*, 1997; Simon *et al.*, 2003). De manière cohérente, Olesen *et al.* (Olesen et al., 2003) ont observé une sévérité de septoriose moindre quand la dose d'azote était diminuée. Ces derniers ont tout de même noté que l'effet de l'azote était moindre lorsque le fertilisant est apporté tardivement. D'autres études apportent des résultats plus mitigés. Ainsi,

Ansar et al. (2007), Leitch et Jenkins (1995) ont montré qu'une augmentation moyenne de la dose d'azote augmentait le risque de septoriose mais qu'une augmentation supplémentaire entraîne une sévérité moindre de la maladie.

Ce manque de consensus pour un facteur néanmoins important ne nous permet pas de lui donner un poids important dans la table d'agrégation de l'«atténuation en culture» mais nous avons choisi de le garder dans la structure du modèle.

➤ La densité de semis

Du côté des densités, les densités élevées sont souvent associées à une plus forte pression de maladie (Broscious et al., 1985; Tompkins et al., 1993) mais l'effet reste irrégulier. La structure du couvert est probablement la meilleure explication. Un couvert plus dense entraîne une augmentation de l'hygrométrie favorable au développement du champignon, offre plus de tissu vert (Broscious et al., 1985; Ansar et al., 2010) et favorise la contamination par des pluies de faible intensité ou par simple contact entre les feuilles du couvert (Lovell et al., 1997). Inversement, la forte densité favorise la fermeture du couvert et empêche les gouttes de pluie de pénétrer à l'intérieur et d'atteindre les feuilles contaminées pour assurer la propagation des pycnidiospores. Cet effet appelé "effet parapluie" a été rapporté par Eyal (1981).

La profondeur de semis ne semble pas jouer de rôle sur les épidémies de septoriose (Broscious *et al.*, 1985; Tompkins *et al.*, 1993).

Seule la densité de semis sera donc intégrée comme attribut de base de notre modèle.

➤ Le contrôle chimique

Le contrôle de la septoriose s'appuie essentiellement sur la lutte chimique, avec la réalisation de 1 à 3 traitements, qui contribuent en moyenne à approximativement la moitié de l'investissement en fongicides sur blé. La première méthode de lutte complémentaire à la lutte chimique est l'emploi de variétés résistantes qui permet de réduire l'investissement fongicide de l'ordre de 20 €/ha soit un tiers à un quart du coût des traitements associés (Gouache et al., 2012).

L'optimisation de la dose, du positionnement et du choix du premier (et parfois seul) traitement doit être la priorité dans le cadre de la protection chimique raisonnée. La surface verte des deux dernières feuilles est la principale composante du rendement,

la feuille drapeau pouvant contribuer à 45% au remplissage du grain. Le positionnement du premier fongicide résulte donc d'un « compromis entre l'attente de l'émergence de ces deux feuilles et le contrôle précoce de la maladie » (Gouache et Couleaud, 2009). L'observation est donc essentielle soit au niveau de la feuille F2 (stade 2 nœuds), soit au niveau de la F3 au stade dernière feuille pointante et des seuils sont préconisés pour déclencher un traitement (Arvalis, 2013). Un modèle de prévision comme Septo-Lis peut aussi permettre de positionner au mieux un éventuel traitement (Arvalis, 2013). De plus, certaines souches de septoriose sont résistantes à des fongicides, particulièrement aux strobilurines, et à des niveaux variables aux triazoles et aux SDHI (Inhibiteurs de la Succinate Déshydrogénase) ; l'efficacité des produits peut être ainsi compromise, leur application doit donc être évitée, limitée ou renforcée (Arvalis-INRA-ANSES, 2013). Néanmoins, de très bonnes efficacités sont toujours atteintes, de 70% à 85% selon le produit utilisé et son positionnement et un gain moyen de plus de 17q ha⁻¹ entre parcelles traitées et non traitées (Arvalis, 2013d).

Néanmoins, dans les systèmes à bas niveau d'intrants en développement en Europe de l'Ouest, les perspectives de contrôle de la maladie ne reposent plus uniquement que sur l'application de fongicide mais aussi sur le choix cultural et la modification de la date de semis (Jordan et Hutcheon, 1999).

Le contrôle chimique sera donc un attribut de base possédant un poids important dans la construction d'IPSIM-Wheat-*Septoria tritici*.

1.3.2. L'environnement de la parcelle

La structure du territoire et l'agencement des systèmes de culture peut contribuer à limiter la progression d'une épidémie de septoriose et à maintenir la durabilité des résistances variétales. La dynamique de ce pathogène, avant tout aérien, est en partie conditionnée par l'agencement des systèmes de culture, qui détermine la proximité des cultures sensibles et les plantes hôtes, support de l'inoculum primaire (Abecassis et al., 2011).

➤ La présence de Poacées

Vingt-six adventices et cultures appartenant aux Poacées sont recensées pouvant être hôtes de *Septoria tritici*. Donc ces plantes infestées représentent des sources d'inoculum primaire. Cependant, ces plantes ne peuvent pas être un pont végétal (« green bridge ») entre la récolte et le semis du blé car elles meurent en même temps que le blé (Suffert et Sache, 2011). La destruction systématique des repousses de céréales à paille et des adventices n'impactera que très peu la présence de septoriose car elles ne représentent qu'une source secondaire d'inoculum primaire (Eyal, 1999; Suffert et Sache, 2011).

Ce facteur ne sera donc pas pris en compte dans notre modèle.

➤ La proportion de blé au niveau du paysage

Les ascospores de *Mycosphaerella graminicola* peuvent être transportées par le vent d'un champ contaminé adjacent à un champ sain principalement durant l'émergence de la culture puis des trois dernières feuilles (Pietravalle et al., 2003; Suffert et al., 2011). La quantité d'ascospores transportées par le vent est corrélée aux précipitations, l'humidité relative et la température de l'air (Simon et Cordo, 1999). Ainsi, la proximité avec une autre culture de blé dans le système de culture ou dans le voisinage peut être une source d'infection (Aylor, 1999). Au sein du couvert, les spores de *Septoria tritici* assurant les contaminations secondaires se transfèrent ensuite principalement par éclaboussures de pluie et par contact sur de courtes distances.

Ce facteur nous a semblé suffisamment important pour être pris en considération dans IPSIM-Wheat-Septoria tritici.

1.3.3. L'effet du pédoclimat

➤ Le sol

L'influence du sol sur les épidémies de septoriose n'est pas référencée dans la littérature et ne semble pas avoir un effet important étant donné que cette maladie n'est pas endocyclique. Nous ne considérerons pas ce facteur.

➤ Le climat

Les conditions climatiques favorables à la septoriose ont-elles été largement étudiées par les chercheurs et constituent l'un des facteurs ayant le plus d'influence sur le développement d'une épidémie

- Un hiver froid et sec réduit l'inoculum primaire et ralentit la progression de la maladie, contribuant aussi à des épidémies de moindre importance au printemps (Gouache et Couleaud, 2010). Les températures douces du mois de janvier favorisent l'installation de la maladie alors que les gelées de février et la sécheresse de mars ne semblent pas la perturber.

- Au printemps, les pycnidiospores sont libérées grâce aux épisodes pluvieux et les pycnides ne peuvent expulser les spores que si elles sont suffisamment humectées (Suffert et al., 2011). De plus, la dispersion des pycnidiospores par éclaboussures de pluie est la plus importante cause de contamination des feuilles hautes (ARVALIS, 2013b). Le risque de septoriose est particulièrement élevé à partir de 10 mm de précipitations en un seul jour ou en moins de trois jours consécutifs. Si ces conditions coïncident avec l'émergence de feuilles, ce sont ces même feuilles qui seront contaminées (Gladders et al., 2001) et la maladie aura une progression maximale (Gouache et al., 2009). Ainsi les épisodes pluvieux et l'humidité ambiante d'avril et mai sont les moteurs des épidémies de septoriose (Arvalis, 2013d). Les températures optimales pour le développement de la septoriose se situent entre 17 et 25°C (Simon et al., 2003) 2°C semblant un minimum et 30°C un maximum (Suffert et al., 2011).

Les facteurs pouvant influencer la dynamique et la sévérité de la septoriose sont donc multiples et interagissent entre eux. Il est donc nécessaire de prendre en compte par une approche systémique l'ensemble de ces effets pour pouvoir prédire le dégât final du à ce pathogène. C'est l'objectif du modèle IPSIM-Wheat-*Septoria tritici*.

1.4. Construction du modèle IPSIM-Wheat-*Septoria tritici*

Plusieurs facteurs, analysés précédemment, peuvent donc influencer le développement la septoriose : le climat, les pratiques de l'agriculteur et l'environnement de la parcelle. L'identification du sens de l'effet (favorisant : +,

défavorisant : -, neutre : 0), de l'intensité (+++, ++, +) et de l'impact de chacun de ces facteurs ont ensuite été recensés de façon la plus exhaustive possible grâce à une bibliographie internationale, nationale et à dire d'experts et sont résumés dans l'Annexe 14 (Carrière, 2013). Ces données bibliographiques ont permis la construction du modèle IPSIM-Wheat-*Septoria tritici*, en utilisant la démarche IPSIM et le logiciel DEXi (Aubertot et Robin, 2013).

Dans notre modèle, les variables d'entrée expliquent les facteurs favorisants décrits précédemment, les tables d'agrégation combinent et pondèrent ces différents facteurs et la sévérité finale de la maladie exprimée en 5 classes représente la variable de sortie du modèle (Figures 29 et 30).

Attribute	Description
Incidence of Septoria tritici	
Effect of climate	Effect of climate on the disease severity
Autumn-Winter	Effect of the autumn and winter climate on the septoria dynamics
Spring	Effect of the spring climate on the septoria dynamics
Cultural practices	Effect of cultural practices in the incidence of septoria
Primary inoculum management	Management of the primary source according to the interactions between the crop sequence and the tillage practices
Pre-previous crop	Pre-previous crop: host (wheat), non-host (non wheat)
Previous crop	Previous crop: host (winter wheat), non-host (non wheat)
Tillage of the pre-previous crop	Soil preparation before sowing of the pre-previous crop: tillage, no-tillage, no-tillage and crushing of residues and stubbles
Tillage of the previous crop	Soil preparation before sowing of the previous crop: tillage, no-tillage, no-tillage and crushing of residues and stubbles
Escape: effect of the sowing date	Sowing date
Mitigation through crop status	Mitigation of the disease thanks to the crop management
Cultivar choice	Management of the disease incidence thanks to the cultivar's level of resistance and/or the mixture of cultivars
Variety	Cultivar choice according to GEVES grades
Varietal mixture	Mixture of wheat cultivars
Nitrogen fertilization	Nitrogen fertilization level
Sowing density	Number of seeds per m
Fungicide protection	Efficiency of the fungicide program according to the chemical family and the resistance to it of the septoria strains
Biologic environment	Impact of the biological environment on septoria incidence
Primary inoculum sources	Primary inoculum sources in the field and surroundings areas
Grassy weeds host of septoria	Proportion of grassy weeds in the cropping system
Wheat in the cropping system	Proportion of wheat crops in the surroundings and distance from another wheat crop

Figure 29 : Structure hiérarchique du modèle IPSIM-Wheat-*Septoria tritici*

Attribute	Scale
Incidence of Septoria tritici	80-100; 60-80; 40-60; 20-40; 0-20
Effect of climate	Very favorable; Favorable; Moderately; Unfavorable
Autumn-Winter	Very favorable; Favorable; Unfavorable
Spring	Very favorable; Favorable; Unfavorable
Cultural practices	Very Favorable; favourable; Moderately; Unfavorable
Primary inoculum management	Favorable; Moderately; Unfavorable
Pre-previous crop	Host; Non host
Previous crop	Host; Non host
Tillage of the pre-previous crop	Non-inversion; No-inversion and crushing; Inversion
Tillage of the previous crop	No-inversion; No-inversion and crushing; Inversion
Escape: effect of the sowing date	Early; Normal; Late
Mitigation through crop status	Favorable; Moderately; Unfavorable
Cultivar choice	Favorable; Moderately; Unfavorable
Variety	Very susceptible to susceptible; Moderately susceptible; Quite to highly resistant
Varietal mixture	No; Yes
Nitrogen fertilization	Excess level; Balanced level
Sowing density	High; Normal; Low
Fungicide protection	Efficient; Moderately efficient; Unefficient
Biologic environment	Favorable; Unfavorable
Primary inoculum sources	Favorable; Moderately; Unfavorable
Grassy weeds host of septoria	Important; Normal; Low
Wheat in the cropping system	Favorable; Moderately; Unfavorable

Figure 30 : Echelles attribuées aux attributs de base et d'agrégation

Faute de temps, ce modèle n'a pas encore pu être évalué et validé par un jeu de données indépendantes. Ce travail sera réalisé à l'issue de la thèse.

Le modèle IPSIM-Wheat-*Septoria tritici* ainsi achevé sera intégré au modèle IPSIM-Wheat pour prévoir le profil de dégâts (septoriose comprise) en fonction des conditions pédoclimatiques, des pratiques de l'agriculteur et de l'environnement de la parcelle

2. IPSIM-WHEAT-Fusarium and IPSIM-WHEAT-Mycotoxins

Comme pour les autres modèles, la démarche de développement du modèle Fusariose a suivi les mêmes étapes : recherche bibliographique permettant de décrire les relations entre la maladie, les pratiques culturales, le pédoclimat et l'environnement, construction du modèle, recueil de données, évaluation du modèle (synthèse bibliographique disponible en **Annexe 15**).

2.1. Epidémiologie de la maladie

Les fusarioses des épis du blé résultent du développement d'agents pathogènes susceptibles d'appartenir à deux genres différents : le groupe *Fusarium* spp. et le groupe *Microdochium* spp.

La fusariose se révèle être une des maladies les plus préoccupantes du blé puisqu'elle affecte non seulement le rendement avec des pertes allant de 30 à 70 % quand les conditions environnementales sont favorables (Arvalis, 2012), mais aussi la qualité des grains (Champeil et al., 2004a). Cinq espèces majeures de *Fusarium* sont présentes en France dont *F. graminearum*, espèce dominante sur le territoire et *F. culmorum*. Tous les *Fusarium* sont susceptibles de produire des mycotoxines. Ces mycotoxines sont issues du métabolisme secondaire des champignons (Chelkowski, 1991 ; Galtier et al. 2000), et sont produites lorsque leur croissance s'arrête ou se ralentit fortement: elles résultent de l'adaptation du champignon à une situation de stress (Thouvenot, 2002).

Microdochium est représenté par deux espèces : *M. nivale*, la plus fréquente et *M. majus*. A l'inverse des *Fusarium*, ces espèces ne produisent pas de mycotoxines. Elles s'infiltrent néanmoins à l'intérieur du grain et peuvent en altérer les propriétés germinatives.

L'équilibre écologique entre ces deux types fongiques va donc être l'un des facteurs déterminant de la présence de mycotoxines dans les grains fusariés.

La toxine fusarienne déoxynivalénol (DON) est la mycotoxine la plus abondante au monde et c'est elle qui sera analysée dans notre travail de mise en relation avec les pratiques, le pédoclimat et l'environnement de la parcelle. L'ingestion d'aliments contenant des mycotoxines, suivant la dose et la fréquence d'ingestion a des effets différents sur la santé des animaux et des Hommes. Une forte dose de Don cause des vomissements alors qu'une exposition chronique à de faibles doses peut éliciter l'anorexie, des retards de croissances, de l'immuno-toxicité, des troubles de reproduction, des problèmes hormonaux ou des problèmes intestinaux (IARC, 2012 ; Bakan, 1998 ; Eudes, 1998 ; Bottalico, 1998).

La présence et la quantité de ces mycotoxines dans les céréales à la récolte constituent des critères déterminants de la qualité des grains. La communauté européenne a d'ailleurs baissé de nouveau les limites de tolérance en mycotoxines dans les céréales grâce à l'entrée en application en 2007 de la réglementation CE N° 1881/2006 (EFSA, 2006).

L'infection par les *Fusarium* est favorisée par des conditions de pluie et d'humidité qui surviennent pendant la période épiaison-floraison chez les céréales et la sortie des soies chez le maïs. Les facteurs climatiques et agronomiques influencent fortement leur développement, mais différent d'une espèce à l'autre. *F. graminearum* sera prépondérant dans toutes les régions françaises, les régions les plus froides étant le terrain de prédilection de *Microdochium*.

Les *Fusarium* survivent essentiellement sur les débris végétaux sous forme de mycélium et peuvent au printemps produire des spores (conidies et ascospores) sur les débris laissés à la surface du sol. Les autres sources d'inoculum incluent de nombreuses plantes hôtes qui peuvent être des plantes cultivées ou des adventices (Blé, maïs, orge, soja, avoine, triticale et autres graminées). Les graines contaminées peuvent aussi être une source d'inoculum (Lori et al., 2009).

Dans le cas de *Fusarium graminearum*, les asques se développent et expulsent à maturité les ascospores en mai et juin, lorsque l'humidité est suffisante et sur de très faibles distances (Osborne et Stein, 2007). Ces spores sont dispersées par le vent sur les feuilles et les épis. Elles forment les bases de la contamination primaire. Les conidies présentes sur les résidus de culture ou aux premiers étages de la plante, se

propagent par éclaboussures au niveau des étages supérieurs jusqu'à l'épi qu'elles contaminent en germant au travers des anthères.

Pour la dispersion de *Microdochium*, les éclaboussures de pluie ou effet splashing tiennent également un rôle important. Une goutte de pluie tombant au sol, capture la conidie et l'emporte sur une feuille lorsqu'elle rebondit. La propagation s'effectue ainsi, de façon ascendante, jusqu'à la fleur (Champeil et al., 2004)..

2.2.Effet des pratiques culturales, du pédoclimat et de l'environnement de la parcelle sur la sévérité de la fusariose et la contamination en DON

Le climat est réputé être le déterminant principal du développement de la fusariose de l'épi (Langseth et al., 1995), et pourrait donc également jouer un grand rôle dans la production de mycotoxines (Sutton, 1982; Blaney et Dodman, 2002 ; Chelkowski et al., 2000; Hooker et al., 2002; Magan et al., 2002). Une même année, deux parcelles voisines, cultivées différemment, ne sont pas toujours infectées de la même façon (Dill-Macky et Jones, 2000; Champeil et al., 2004a). D'autres facteurs, comme les pratiques culturales joueraient donc un rôle dans la sévérité de la fusariose et le niveau de contamination en DON. Il est donc envisageable, dans une certaine mesure, de limiter la production de mycotoxines fusariennes en optimisant le système de culture.

Pour cette raison, nous avons décidé de comprendre, analyser et modéliser, non seulement les effets des pratiques culturales, du pédoclimat et de l'environnement sur la sévérité de *F.graminearum* (principale espèce de *Fusarium* sur blé) mais également sur la DON (principale mycotoxine recherchée sur blé). Ce travail porte donc sur un enjeu important non seulement pour réduire l'utilisation des fongicides, mais aussi pour assurer une meilleure qualité sanitaire et technologique des blés.

2.2.1. Les pratiques culturales

➤ La succession des cultures

Elle a une grande importance dans la maîtrise du risque d'infection par *F. graminearum* (Leplat et al., 2013). Les précédents sensibles, laissant derrière eux des résidus contaminés, sont à éviter. Les dégâts causés par la fusariose

augmentent avec l'introduction du maïs, de l'avoine et du blé dur dans la rotation plutôt que du blé tendre ou de l'orge (Champeil et al., 2004b). Comparativement à un semis sur un précédent de blé ou pire de maïs, une diminution de la fusariose de l'épi a été observée lorsque le blé est semé sur un précédent comme le soja, le pois, la betterave, le lin, la luzerne ou le trèfle (Pageau et al., 2009).

Des systèmes de culture de plus en plus courant actuellement (Etats-Unis, Canada, Argentine) combinant un travail superficiel du sol et une utilisation massive du maïs comme précédent au blé connaissent un fort accroissement de la sévérité de la fusariose (Dill-Macky et Jones, 2000; Lori et al., 2009). Cependant, la succession des cultures a elle seule ne permet pas de contrôler le développement des fusarioses car les agents de propagation de la maladie sont présents dans l'air durant toute l'année selon une étude réalisée au Brésil (Reis, 1988; Lori et al., 2009).

En ce qui concerne la contamination en DON, le blé suivant un maïs présente des concentrations en DON 6 fois plus élevés que dans un blé suivant une autre céréale ou un soja (Teich et Hamilton, 1985; Champeil et al., 2004b) et un blé suivant un colza contient 90% moins de DON qu'un blé suivant un maïs (Krebs et al., 2000).

Ce facteur de première importance dans le contrôle des *Fusarium* et des mycotoxines, en interaction avec le travail du sol, sera donc déterminant dans les tables d'agrégation de notre modèle.

➤ Le travail du sol

A ce jour, il existe un consensus pour affirmer que le travail du sol sans labour augmente la fréquence de la fusariose, alors que le labour la diminue (Dill-Macky et Jones, 2000; Champeil et al., 2004b; Steinkellner et Langer, 2004; Fernandez et al., 2008). En effet, une diminution de la densité de résidus en surface du sol aide à réduire la production d'inoculum et la quantité de spores produites par unité de surface de sol (Teich et Hamilton, 1985; Bateman et al., 1998). Ainsi, il a été démontré expérimentalement que la diminution de la densité de résidus de maïs en surface accompagné d'un labour profond diminue sensiblement la sévérité et l'incidence de la fusariose (jusqu'à 50% en moins) (Blandino et al., 2010).

L'inversion du sol semble avoir le même effet sur la production de mycotoxines que sur la maladie elle-même et des études ont montré une diminution de la

concentration de DON dans les systèmes avec labour en comparaison avec les systèmes sans labour ou en semis direct. (Schaafsma et al., 1998; Dill-Macky et Jones, 2000; Krebs et al., 2000).

Ce facteur sera donc un élément important des tables d'agrégation d'IPSIM-Wheat-*Fusarium* et DON, et sera analysé en interaction avec la succession des cultures.

➤ La date de semis

Très peu de travaux ont porté sur l'effet de cette pratique sur la fusariose. Plusieurs études (Cosic et al., 2006; Jurkovic et al., 2006; Pageau et Fillion 2009) suggèrent que les semis tardifs favorisent le développement des fusarioses, ce qui peut être expliqué par l'influence de la date de semis sur la date de floraison et la concomitance avec les libérations d'ascospores. Néanmoins, des résultats contradictoires ont été obtenus dans d'autres études : la résistance à la fusariose serait indépendante des facteurs de maturité et les semis tardifs favoriseraient le développement de la fusariose des épis alors que les semis précoces favoriseraient le développement des attaques sur tige (Champeil et al., 2004b).

Les variétés fleurissant plus précocement semblent également accumuler plus de DON que celles à floraison plus tardive par plus grande coïncidence de la phase de sensibilité maximale des plantes avec la période la plus favorable d'émission des spores (Champeil et al., 2004b).

Cette pratique ne pourra donc avoir un poids important dans le modèle.

➤ La densité de semis

La densité de semis peut également influencer la contamination, mais de façon limitée. En effet, dans le cas de fortes densités, deux effets opposés ont pu être observés. Tout d'abord, les densités élevées augmentent l'humidité dans le couvert favorisant la germination des spores, mais *a contrario*, augmentent le nombre d'obstacles limitant la dispersion verticale des spores vers l'épi. Néanmoins, des attaques plus sévères ont été reportées en cas de densités élevées, soit plus de 350 grains m⁻² (Champeil et al, 2004b).

Comme pour la date de semis, il existe peu d'études qui confirment ces résultats. Ce facteur jouera donc dans les tables d'agrégation du modèle développé.

➤ La fertilisation azotée

L'azote peut jouer un rôle important sur les épidémies de fusariose. Il est souvent rapporté qu'une augmentation des doses d'azote engendre une augmentation de la sévérité de la fusariose et du taux de mycotoxines (Lemmens *et al.*, 2004; Burgt *et al.*, 2011). Cependant, ces effets restent irréguliers et parfois controversés d'une année à l'autre (Fauzi et Paulitz, 1994; Subedi *et al.*, 2007). Ainsi, Subedi *et al.* (2007) ont trouvé des différences faibles et inconsistantes entre années et entre traitements d'azote sur la sévérité de la fusariose sur des essais de blé menés au Canada. Ce facteur sera pris en compte dans notre modèle mais n'aura pas un poids important.

➤ Le choix variétal

Le choix variétal est l'un des principaux pour lutter contre les fusarioses de l'épi. Néanmoins, tous les cultivars sont sensibles et il n'existe pas de résistance totale. (Bai *et al.*, 2001). Il existe différents mécanismes de résistance au développement du champignon et à l'accumulation de DON, le mécanisme le plus fréquemment rencontré correspond à une résistance à la propagation de la maladie (Champeil *et al.*, 2004b). A ce jour, il est possible de lutter efficacement contre la maladie en choisissant des variétés moins sensibles (Arvalis, 2012a, 2013c)

Ce facteur aura donc un poids important dans la table d'agrégation des variables « atténuation en culture ».

➤ Mélanges variétaux

Aucune information relative à l'intérêt des mélanges variétaux n'est disponible, ce facteur n'a donc pas été retenu comme variable d'entrée du modèle.

➤ Le contrôle chimique

L'efficacité des traitements fongicides est variable et difficile à prévoir. Elle dépend non seulement de la substance active mais aussi du mode d'application, de la date du passage et de la structure génétique de la population pathogène vis-à-vis de l'éventuelle résistance à la molécule utilisée (Homdork et al., 2000). Ainsi, les traitements fongicides doivent être considérés comme un ultime recours car sont loin d'être totalement efficaces. En effet, les applications fongicides atteignent dans le meilleur des cas 60 à 70% d'efficacité. Elles doivent impérativement être réalisées préventivement et le stade de la céréale le plus sensible est le stade floraison. Le risque climatique devient en effet très élevé dès que le nombre de jour de pluie supérieur à 1mm dépasse 4j ou que la somme des précipitations augmente (Arvalis, 2012a).

Une application de triazole décroît le niveau de contamination en DON en conditions contrôlées, mais des résultats contradictoires ont été obtenus à ce propos (Simpson et al., 2001). Plus généralement, en conditions naturelles, l'application de fongicides ne diminue pas significativement les concentrations en DON. Cela peut s'expliquer par la multiplicité des espèces fongiques de *Fusarium* et *Microdochium* se trouvant dans le champ et leur sensibilité différente aux fongicides ; une autre hypothèse suggère qu'une trop faible dose de fongicides stimulerait la production de DON (Magan et al., 2002).

Pour conclure sur les méthodes culturales, trois d'entre elles sont aujourd'hui considérées comme prépondérantes pour contrôler la maladie et la production de mycotoxines : le travail du sol, le choix du précédent et d'un cultivar adapté et l'application des fongicides (Arvalis, 2013c). Ces quatre facteurs influencent donc fortement les sorties du modèle.

2.2.2. Le pédoclimat

Très peu de connaissances existent sur l'influence de la composition du sol sur la fusariose, et sa capacité à sporuler en fonction de l'aération, de la porosité ou de l'humidité. Il semble néanmoins que les sols humides l'hiver entraînent une diminution du taux de survie du pathogène (Sutton, 1982).

Ce facteur ne sera donc pas pris en compte dans notre modèle.

Comme nous l'avons annoncé précédemment, le climat est lui reconnu comme étant le déterminant principal du développement de la fusariose de l'épi et dans la production de mycotoxines (Doohan et al., 2003; Mueller et al., 2010).

Le complexe parasitaire responsable des attaques de fusariose peut varier d'une année sur l'autre et d'une région à l'autre, selon le climat et les variétés. Le climat contrôle en partie la compétition entre espèces. Ainsi, à la floraison, le développement de *Microdochium* est favorisé par des températures basses (6-18°C) et des pluies alors celui de *Fusarium* l'est par des températures élevées (20-26°C) et des orages. *F.graminearum* est généralement prédominant en régions chaudes et *M.nivale* en régions plus froides (Leplat et al., 2013).

2.2.3. L'environnement de la parcelle

Un certain nombre de plantes adventices présentes dans l'environnement proche de la parcelle peuvent servir de plantes hôtes et de réservoirs d'inoculum, sans que leur rôle dans l'épidémiologie ne soit totalement élucidé (Champeil et al., 2004a). Ce facteur ne sera donc pas pris en considération.

2.3. La modélisation de la fusariose et des mycotoxines

La recherche bibliographique a permis d'identifier 14 modèles. 6 modèles sont spécifiques à la fusariose, 4 au déoxynivalénol et 4 étudient à la fois la fusariose et le déoxynivalénol. Tous ces modèles sont des modèles déterministes. C'est-à-dire qu'ils n'incluent pas de variable aléatoire dans leurs équations. Les synthèses de chaque modèle ont été regroupées sous forme de tableau. Un tableau a été créé pour les modèles relatifs à la fusariose et un pour ceux relatifs au déoxynivalénol, ils sont disponibles respectivement en **Annexe 16** et en **Annexe 17**.

Cette synthèse bibliographique a permis de mettre en avant le fait que la plupart des modèles actuels sur la fusariose sont assez complexes d'utilisation ou ne sont pas très précis. D'autre part, certains modèles sont vraiment spécifiques à des régions particulières et ne sont pas transposables à la situation française. Enfin, ces modèles sont majoritairement basés sur des variables climatiques et ne tiennent compte que très rarement des variables agronomiques.

2.4. Construction et validation des modèles IPSIM-Wheat-*Fusarium* and IPSIM-WHEAT-Mycotoxins

Pour les modèles IPSIM Fusa et IPSIM Don, 7 attributs de base ont été retenus grâce aux recherches bibliographiques et ont permis d'aboutir à la structure de l'arbre d'agrégation (**Figure 31**). Les attributs de base et leurs échelles (**Annexe 18**) sont les mêmes pour les deux modèles, car la fusariose et le déoxynivalénol sont impactés par les mêmes facteurs. Seules les règles d'agrégation pourront varier et donc l'importance relative des poids des différents attributs.

Les attributs agrégés sont identiques à ceux du modèle IPSIM Wheat pour permettre une genericité. On notera cependant que les paramètres pédologiques et ceux liés à l'environnement biologique n'ont pas été pris en compte, car ils ne sont pas décrits dans la littérature.

L'attribut final est la sévérité de fusariose ou la teneur en Don pour les modèles IPSIM Fusa et IPSIM Don respectivement.

Une première évaluation du modèle IPSIM-Don a été réalisée et donne des résultats encourageants (**Figure 32**).

Environ 42% des classes simulées par le modèle sont dans la même classe que les observées et presque 80% des classes simulées ont au plus une classe de différence avec les classes observées.

Il semble également que les prédictions de ce premier modèle tendent à légèrement sous-estimer les valeurs observées.

Les travaux se poursuivent sur l'évaluation et l'ajustement par expertise des règles d'agrégation de ce modèle.

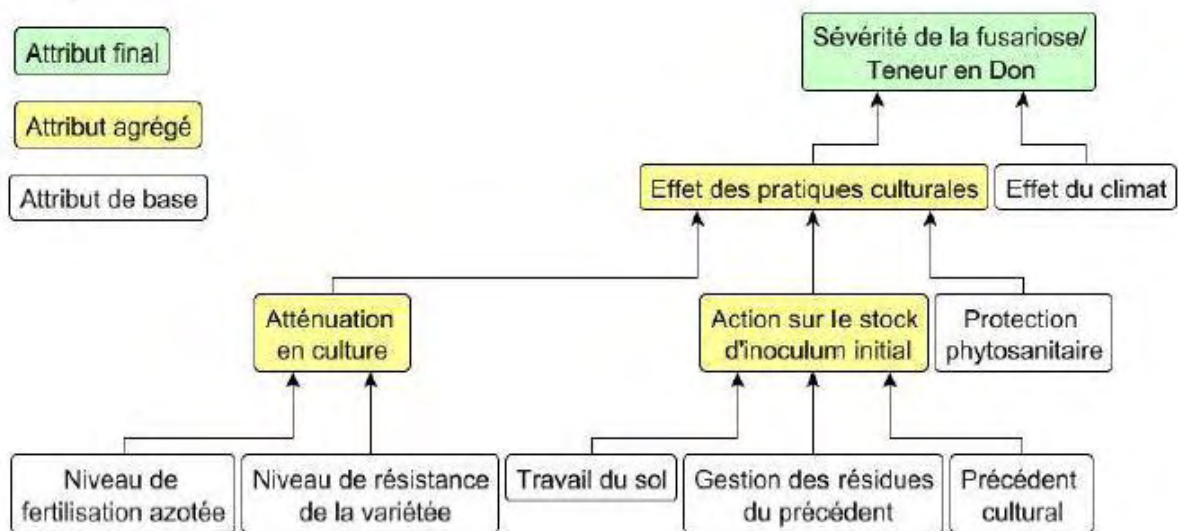


Figure 31 : Structure générale des modèles IPSIM Fusariose et IPSIM Don

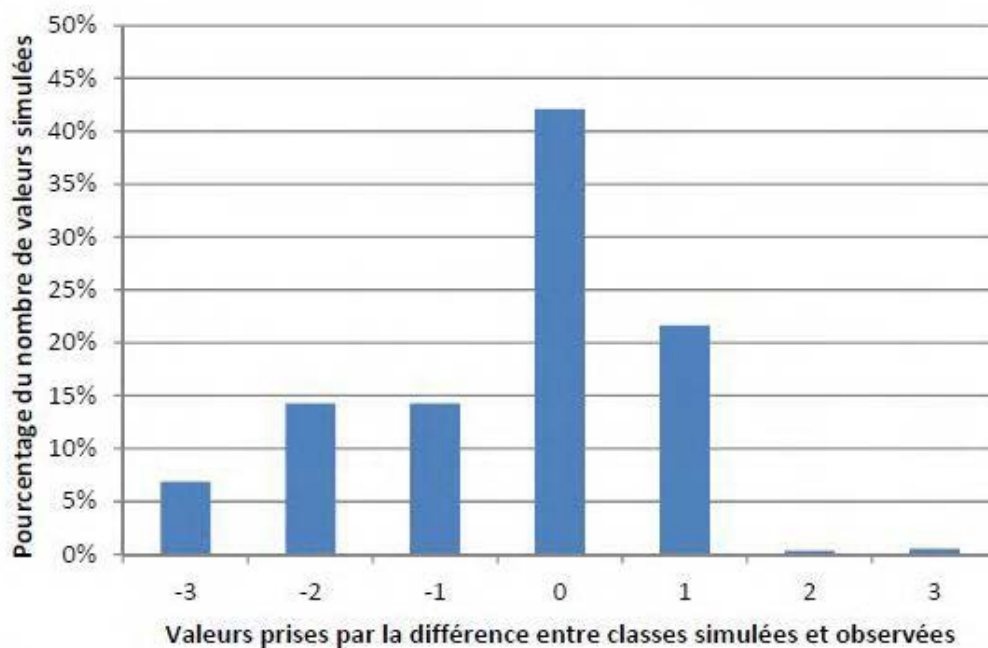


Figure 32 : Evaluation de la qualité prédictive du modèle IPSIM-Wheat-Fusarium. Distribution des résidus : nombre de classes de différence entre classes observées et simulées.

3. IPSIM-WHEAT-Powdery Mildew

Nous ne décrivons pas en détail, l'épidémiologie, le choix des facteurs favorisant impactant la sévérité de l'oïdium du blé ainsi que la construction de ce modèle. En effet, la méthode est identique à celle retenue pour les autres modèles IPSIM-Wheat et la démarche est celle présentée par Aubertot et Robin (2013). Ce modèle est en cours de construction et d'évaluation.

4. IPSIM-WHEAT-Aphids

IPSIM-WHEAT-Aphids est encore en cours de construction et d'évaluation, mais des recherches bibliographiques ainsi qu'un groupe d'experts ont déjà permis d'élaborer une première version.

Ce modèle sera le seul ayant pour objectif de prédire les dégâts causés par un insecte en fonction des pratiques culturales, du pédoclimat et de l'environnement de la parcelle. En effet, les pucerons des épis sont les ravageurs les plus importants des cultures de blé au printemps.

4.1. Eléments d'épidémiologie et choix des variables d'entrée du modèle

Concernant les épis du blé, sous nos climats, 3 espèces de pucerons se développent sur épis de blé; *Sitobion avenae*, *Rhopalosiphum Padi* et *Metopolophium dirhodum*.

Puceron le plus abondant au printemps, *S.avenae* sera le seul à être pris en considération dans ce travail. Ce puceron peut, en cas de forte infestation, provoquer une diminution du nombre de grains par épi et par conséquent une diminution sensible du rendement (Hulle, 2011). Il peut aussi être vecteur de virus, et transmettre à l'automne la jaunisse nanifiante de l'orge (BYDV) (Fabre et al., 2003; Fabre et al., 2005).

De nombreux paramètres influencent la présence des pucerons en facilitant ou limitant leur installation dans les cultures. Il importe de bien caractériser et hiérarchiser les facteurs les plus influençant la dynamique des populations de pucerons afin de pouvoir construire le modèle et les tables d'agrégation.

Les pratiques culturales et la gestion des cultures ont un effet important sur les processus de dispersion des pucerons (Al Hassan, 2012). Voici la synthèse bibliographique des facteurs retenus pour construire le modèle IPSIM-WHEAT-Aphids.

- Le choix des successions culturales est un facteur important puisque les ravageurs peuvent se développer sur différentes cultures céréalières de la rotation. Par la suite, la combinaison du précédent et du travail du sol peut favoriser la présence de repousses de céréales ; celles-ci servent alors de plantes hôtes réservoir pour l'hivernation des pucerons et facilitent la contamination des blés au printemps (Dedryver, 1986).

- L'adaptation de la date de semis est aussi un levier important dans la réduction des risques de pucerons par stratégie d'évitement. Le blé semé tôt peut être contaminé dès l'automne par les pucerons y compris *S. avenae*. Un climat à hiver doux (type climat océanique) permet alors le maintien des populations de pucerons pendant la mauvaise saison. Les colonies aphidiennes déjà sur place au début du printemps ont donc un avantage considérable pour se multiplier (Dedryver et al., 2011). Seules des périodes humides et froides en mai, et pendant la première quinzaine de juin, entravent l'installation des pucerons dans les cultures (Dedryver et al., 2008; Dedryver et al., 2011). Néanmoins, cette situation est propre au climat océanique, car pour les régions à climat plus froid, les hivers plus rigoureux empêchent la survie des pucerons pendant l'hiver. Dans ce cas, les semis tardifs, moins avancés au printemps, sont plus infestés que les semis précoces (Dedryver et Tanguy, 1984 ; Holland, 1997).

- Une densité de semis faible augmente la densité des pucerons qui est inversement proportionnelle à la surface foliaire du blé (LAI). De plus, le nombre de talles plus élevé pour les faibles densités permet une présence plus prolongée des pucerons sur les nouvelles talles que dans le cas des densités élevées ou le tallage s'arrête plus tôt et les feuilles sénescent précocement (Honek, 1987).

- Plusieurs études démontrent que l'azote augmente les niveaux d'attaque de pucerons sur céréales notamment à travers l'augmentation de la taille, de la fécondité et de la durée de vie des pucerons (Aqueel et Leather, 2011). Cependant, les effets de l'azote sur le développement des pucerons ne sont pas

réguliers et sont en interaction avec les conditions climatiques de l'année (Duffield et al., 1997).

- Le choix variétal influence fortement le développement des pucerons dans la mesure où il a été démontré qu'une variété de blé résistante entraîne une diminution du poids des adultes et des performances reproductrices (diminution rapide de la croissance des embryons). L'hypothèse avancée serait une prise de nourriture moins abondante de *S.avenae* sur les plantes résistantes (Caillaud et al., 1994). Les blés barbus sembleraient, à dire d'expert, moins attaqués que les blés non barbus, mais aucune référence scientifique n'a pu être trouvée à ce sujet.

- Les mélanges variétaux semblent être un levier intéressant pour contrôler les populations des pucerons sur épis de blé (Randolph et al., 2007; Shoffner et Tooker, 2013) mais la littérature est encore assez réduite à ce sujet et nous ne prendrons pas ce facteur en considération dans les attributs de base du modèle.

- Le contrôle chimique des pucerons des épis passe par un suivi précis des populations. La période de sensibilité des céréales démarre à partir du stade épiaison et se termine au stade grain pâteux (Fabre et al., 2007; Vialatte et al., 2008). Le seuil d'un épi sur deux porteurs d'au moins un puceron, est admis comme étant un indicateur simple et pertinent du début de la croissance de la population. Un traitement au seuil est efficace avec la plupart des produits (pyréthrinoïdes). Un traitement au delà du seuil nécessite d'utiliser un produit à action de choc (Arvalis, 2013c ; Fabre et al., 2007).

-La structure du paysage est un élément important influençant la gravité des attaques de pucerons. Cette variable sera donc prise en compte dans le modèle. L'invasion des pucerons est corrélée négativement avec la complexité des paysages grâce à la présence de milieux favorables au développement d'auxiliaires (Roschewitz et al., 2005; Thies et al., 2005). Il y a une plus faible pression d'insectes ravageurs et de virus de la JNO dans les systèmes diversifiés aux paysages plus fermés que dans les systèmes monocultures avec des paysages ouverts (Rusch et Sarthou, 2013; Rusch et al., 2013). Les pucerons sont aussi présents dans les habitats semi-naturels comme les bordures de champs, les haies, les bandes enherbées, les prairies. Il s'agit alors de zones refuges pour les pucerons mais aussi pour leurs ennemis naturels comme les

syrphes (Rabasse et Dedryver, 1983). Les corridors, les haies jouent également un rôle d'entrave dans la dispersion des pucerons (Al-Hassan et al., 2013).

La mosaïque des cultures dans l'espace joue un rôle bien plus important que la succession des cultures dans le temps, pour ce ravageur faiblement endocyclique (Aubertot et Robin, 2013). Par exemple, la culture de maïs est un excellent réservoir à pucerons et la migration à l'automne est facilitée vers les cultures adjacentes (Al-Hassan et al., 2013). La répartition spatiale des cultures hôtes dans le paysage (maïs, blé, orge) ainsi que la présence de repousses ou de plantes adventices relais influencent la dynamique de colonisation des cultures par les pucerons.

La présence de paysages diversifiés à proximité des cultures de blé favorise donc la survie et la reproduction des auxiliaires, et limite l'établissement des populations de pucerons (Roschewitz et al., 2005). Les auxiliaires qui contribuent à la régulation et au contrôle biologique des pucerons dans les paysages européens sont principalement des prédateurs polyphages tels que les carabes, les syrphes, les araignées, les coccinelles, des parasitoïdes spécialisés et des agents pathogènes dont l'importance relative varie à travers l'Europe (Ostman et al., 2001; Weibull et Ostman, 2003; Thies et al., 2005). La présence de ces ennemis naturels est très largement dépendante des conditions climatiques mais aussi des pratiques des agriculteurs et de la structure du paysage.

Il sera donc nécessaire de prendre en considération dans notre modèle, non seulement les effets négatifs ou positifs des pratiques, du climat et du paysage sur les pucerons mais aussi sur les auxiliaires associés.

4.2. Construction du modèle IPSIM-WHEAT-Aphids

Un certain nombre de modèles existent déjà et permettent d'analyser la dynamique des populations de pucerons sur épis de blé : modèle de Niehoff (Niehoff et Poehling, 1995), modèle de Skirvin (Skirvin et al., 1997), modèle GETIau01 (Gosselke et al., 2001), modèle APHIDsim (Piyaratne et al., 2013). Ces modèles simulent les dynamiques de populations en fonction du climat et des régulations naturelles, mais les pratiques culturales ne sont pas ou très peu prises en compte.

Il existe aussi des modèles permettant de simuler les dommages ou pertes économiques : le modèle de Larsson (LARSSON H. 2004), le modèle de Rabbinge (Carter and Rabbinge, 1980), le modèle EPIPRE, EPIdemiology for PREdiction and PREvention (Zadoks, 1988), celui de Rossing (Rossing, 1991) et le modèle Wheatpest (Willocquet et al., 2008).

Il n'existe donc pas de modèle permettant de prédire les dégâts dus aux pucerons du blé et plus particulièrement *S.avenae* en fonction non seulement du climat et de la présence des ennemis naturels, mais aussi de l'ensemble des pratiques des agriculteurs.

Le modèle développé ici suit la démarche IPSIM et mobilise le logiciel DEXi, il est en cours de d'évaluation. Peu de travaux ont porté sur l'analyse des effets des pratiques culturales sur les pucerons des épis du blé. Les données disponibles issues d'expérimentations ou de diagnostics en parcelles agricoles recensant l'ensemble des pratiques, la structure du paysage et le climat d'une part et la sévérité des attaques de pucerons d'autre part, sont rares et certainement insuffisantes.

L'**Annexe 19** présente l'état d'avancement de ce travail de modélisation.

Il est important de noter qu'au niveau des stratégies de limitation des populations de pucerons, les moyens de contrôle génétique, cultural, chimique ont été représentés de manière concomitante avec des processus de régulation naturelle.

Les réflexions à ce sujet se poursuivent, notamment sur l'évaluation de l'importance des populations d'ennemis naturels dans les parcelles de blé. En outre, comment apprécier l'importance des éléments semi-naturels utiles dans le paysage et le rôle des plantes hôtes dans la mosaïque des cultures ?

Ce modèle sera par la suite intégré dans le modèle IPSIM-Wheat et les interactions possibles entre les pucerons et d'autres bioagresseurs du blé pourront être prises en considération.

5. IPSIM-WHEAT-Weeds

A l'échelle mondiale, les pertes potentielles de rendement en blé, dues aux plantes adventices (en absence de traitement herbicide), ont été estimées à 30 % (Oerke et Dehne, 1997). Les plantes adventices, au-delà d'un certain niveau d'infestation, limitent le rendement, du fait d'une forte compétition pour la lumière, les ressources

minérales (notamment azotées) et hydriques, mais aussi par leur interaction avec les autres bioagresseurs (hôte possible de champignons et de ravageurs). L'effet négatif de la densité de plantes adventices sur le rendement a été largement étudié et modélisé depuis les premiers travaux de Dew (1972) et Cousens (Cousens, 1985). La compétition entre plantes adventices et culture est dépendante des conditions pédoclimatiques (par exemple, la disponibilité en eau) et agronomiques de la parcelle (par exemple, la disponibilité en azote), ainsi que de l'interaction entre les deux. Il apparaît donc prioritaire de pouvoir modéliser ces différents facteurs et leurs interactions.

Certains organismes et instituts français ou européens proposent déjà des modèles de prédiction des infestations en adventices et des outils d'aide à la décision. Une liste non exhaustive de trois modèles est présentée en **Annexe 20** (Marti, 2013). Ces outils sont très souvent disponibles en ligne, mais à la différence du modèle que nous voulons mettre en place, ils demandent parfois des informations très précises comme le stock semencier initial, le potentiel hydrique du sol, ou alors ne prennent pas en compte tous les facteurs pouvant impacter le développement des plantes adventices comme les conditions pédoclimatiques et notamment les interactions possibles avec les pratiques culturales.

L'objectif du modèle IPSIM-Wheat-Weeds est donc de pouvoir simuler les infestations en plantes adventices en fonction des pratiques culturales, du pédoclimat, et de l'environnement de la parcelle.

5.1. Construction du modèle

5.1.1. *Identification des principales adventices et regroupement en traits fonctionnels*

La difficulté de ce projet réside notamment dans le fait que le terme « plantes adventices » regroupe de nombreuses espèces. Or jusqu'à maintenant les modèles développés selon la démarche IPSIM-Wheat permettaient de prédire l'influence des différents facteurs sur la sévérité d'un seul bioagresseur. Or, dans le cas des adventices, il est nécessaire de considérer une cinquantaine d'espèces. Pour pallier ce problème, il a été décidé de réaliser plusieurs modules appliqués à des groupes d'espèces rassemblées selon des traits, caractérisant des réponses communes à un

facteur du milieu (Lavorel et Garnier, 2002). Nous avons ainsi utilisé la notion de « traits fonctionnels » pour former ces groupes d'adventices. Nous utiliserons la définition de traits fonctionnels proposée par Violle (Violle, 2007) : toute caractéristique morphologique, physiologique ou phénologique mesurable à l'échelle d'un individu, de la cellule à l'organisme entier, sans référence à l'environnement ou à tout autre niveau d'organisation.

Les références dans la littérature sont rares où la notion de trait de vie permet de démêler les relations, interactions entre individus au sein d'agroécosystèmes. Dans leurs travaux Gardarin et al. (Gardarin et al., 2007) ont mis en évidence la corrélation entre les traits de vie et la faculté de germination pour différentes espèces de mauvaises herbes en Europe du nord-ouest. Le concept de trait fonctionnel, issu de l'écologie, sera intégré ici dans l'analyse des interactions entre les pratiques, le pédoclimat et un profil de dégâts dus à différentes espèces d'adventices.

L'avantage des groupes fonctionnels est de réduire la complexité des systèmes suivis tout en rendant compte de la dynamique de l'écosystème étudié (Fried et al., 2008). Dans notre cas les facteurs humains (succession culturale, travail du sol, désherbage chimique ou mécanique, ...) et naturels (sol et climat) constitueront des filtres permettant de regrouper les principales espèces adventices étudiées en groupes fonctionnels. L'étude bibliographique réalisée a eu deux objectifs.

- Dans un premier temps, elle nous a permis de déterminer le nombre d'espèces d'adventices sur lesquelles nous allons travailler.

Le premier filtre appliqué à notre système est lié à la nature de la culture mise en place. C'est le facteur principal contrôlant la composition des communautés d'adventices sur une parcelle (Fried, 2007). Ainsi sur la grande diversité des espèces d'adventices présentes sur les parcelles agricoles (Fried, 2007 ; ITAB, 2012 ; Infloweb 2012), nous avons choisi de ne prendre en compte que les principales espèces présentes en culture de blé d'hiver et d'en sélectionner un nombre restreint (**Tableau 15**).

<i>Nom scientifique</i>	Nom commun	Nombre minimum de pieds/m ² pour faire chuter le rendement de 5%
<i>Galium aparine</i>	Gaillet grateron	1,8
<i>Avena fatua</i>	Folle avoine	5,3
<i>Bromus sterilis</i>	Brome stérile	5 à 15
<i>Papaver rhoeas</i>	Coquelicot	22
<i>Matricaria</i>	matricaire	22
<i>Alopecurus myosuroides</i>	vulpin	26
<i>Lolium multiflorum</i>	ray grass	25
<i>Veronica persica</i>	véronique de Perse	26
<i>Stellaria media</i>	Stellaire = Mouron des oiseaux	26
<i>Geranium spp</i>	Géranium	35
<i>Veronica hederifolia</i>	véronique à feuilles de lierres	44
<i>Lamium spp</i>	Lamier	44
<i>Myositis spp</i>	Myosotis	66
<i>Viola arvensis</i>	Pensée	133
<i>Alchemilla spp</i>	Alchemille	133

Tableau 15 : Sélection des principales adventices du blé selon leur fréquence et leur nuisibilité (en gras les adventices les plus fréquentes (Marti, 2013)).

Pour la construction des différents modules (un pour chaque groupe fonctionnel d'adventice), nous avons choisi de ne conserver que quelques adventices comme espèces de références en espérant pouvoir regrouper certaines d'entre elles afin de ne pas se retrouver avec autant de sous-modèles que d'adventices. Chaque sous-modèle correspondra donc à un groupe d'adventices représenté par une ou deux adventices principales sélectionnées (**Tableau 15**). Ce classement est tout à fait évolutif en fonction de l'avancée des recherches et études et de nouvelles adventices pourront venir se rajouter à la liste préexistante.

- La recherche bibliographique s'est ensuite appliquée à renseigner au maximum les caractéristiques biologiques, physiologiques, phénologiques des principales adventices du blé afin de sélectionner celles qui ont le plus de pertinence dans la

constitution de nos groupes fonctionnels, soit celles présentant une réponse commune à une pratique ou à une combinaison de pratiques (**Annexe 21**).

Afin de former ces groupes, la démarche a consisté à sélectionner parmi ces caractéristiques celles induisant des réponses communes aux différentes pratiques culturales. Après analyse des données bibliographies, il semblerait que les éléments biologiques influençant le plus le développement des adventices en relation avec le système de culture, soient : la période préférentielle de levée, la classe (monocotylédone /dicotylédone), la profondeur de germination et le TAD (Taux Annuel de Décroissance, c'est-à-dire le taux de disparition annuel de semences dans le sol). L'impact des pratiques agricoles va donc varier en fonction de ces différents facteurs. En effet, par exemple un pool d'espèces à TAD élevée (faible persistance dans le sol) et qui germe dans la couche superficielle du sol (<6cm) aura tendance à régresser si l'agriculteur pratique le labour (**Tableau 16**).

Elément de biologie des adventices	Moyen agronomique utilisable
Période de levée préférentielle	Dates de semis diversifiées (alternance de cultures d'hiver et de printemps, retard date de semis en céréales d'hiver) ; Faux semis ; Labour ; Désherbage mécanique
TAD	Labour (durée d'enfouissement des graines)
Profondeur de germination (superficielle à moyenne)	Faux semis ; Labour; Désherbage mécanique
Classe (Monocotylédone/ Dicotylédone)	Désherbage chimique, rotation

Tableau 16 : Moyens agronomiques utilisables selon les traits retenus des adventices (Marti, 2013)

Pour la construction des différents modules d'IPSIM-Wheat-Weeds, des groupes fonctionnels ont été définis en fonction des 3 traits suivants : le TAD, la profondeur de germination et le niveau de résistance aux herbicides. La période de levée est *a priori* déjà prise en compte puisque nous travaillons sur le blé d'hiver (les principales mauvaises herbes étudiées germent de l'automne jusqu'en sortie d'hiver). Logiquement, il devrait exister autant de groupes que de combinaisons possibles entre les paramètres sélectionnés : *TAD élevé/faible x Germination profonde/moyenne-superficielle x Résistance présente/absente*, soit 8 groupes possibles. Néanmoins d'après Infloweb (2012), Arvalis/Cetiom (2013), la Chambre régionale d'agriculture des Pays de la Loire/Arvalis (2006), il semblerait que seules 3

adventices de type graminée (TAD élevée) présentent des résistances en cultures de blé. Elles ne diffèrent que par leur profondeur de germination. De plus, il apparaît que la majorité des adventices à TAD faible étudiées ici (toutes les dicotylédones sauf le gaillet) présentent uniquement une germination dans des horizons superficiels ou intermédiaires. On obtient alors les 5 groupes présentés dans le **Tableau 17**.

Ces choix peuvent encore évoluer en fonction de nouvelles données bibliographiques, ou de dire d'expert.

Ces 5 groupes seront donc associés à 5 modules IPSIM-Wheat-Weeds qui seront ensuite agrégés entre eux pour donner le modèle IPSIM-Wheat-Weeds final.

	TAD	Profondeur de germination	Risque de résistance aux herbicides	Exemples
Groupe 1	élevé	Profonde	Oui	Folle avoine
Groupe 2	élevé	Profonde	Non	Gaillet grateron
Groupe 3	élevé	Moyenne-superficielle	Oui	Vulpin, Ray grass
Groupe 4	élevé	Moyenne-superficielle	Non	Autres graminées (Bromes)
Groupe 5	faible	Moyenne-superficielle	Non	Coquelicot, Véroniques...

Tableau 17 : Présentation des 5 groupes fonctionnels mis en évidence (Marti, 2013)

5.1.2. Etudes des facteurs favorisant le développement des adventices et conception du modèle

Comme décrit précédemment pour les autres modèles IPSIM-Wheat, les effets des pratiques sur les dégâts du bioagresseur modélisé s'organisent en 4 attributs.

- L'action sur l'inoculum initial (stock semencier) : la succession des cultures, le faux semis, le travail du sol (à différentes profondeurs) et les techniques de semis (semis direct ou classique), la gestion de l'interculture (mise en place de couverts...)
- Les stratégies d'évitement : le décalage de la date de semis.
- L'atténuation en culture : le niveau de fertilisation azoté, la gestion de la compétitivité de la culture (choix de variétés plus ou moins concurrentes, densité et écartement de semis, culture associée...)

- Les solutions de rattrapage (contrôle chimique ou mécanique)

A ces facteurs culturels, il faut ajouter les 2 autres attributs d'agrégation : l'effet des conditions pédoclimatiques et des éléments paysagers.

La diversité des espèces adventices, et notamment leur réponse à l'action des différents facteurs pédoclimatiques et agronomiques étant complexe à étudier des arbres satellites (futurs branches du modèle) ont été développés. Faute de temps, le travail d'agrégation des arbres satellites et d'évaluation du modèle seront effectués après ce travail de thèse. Le modèle IPSIM-Wheat-Weeds sera donc composé de 5 arbres satellites (un module pour chaque groupe fonctionnel d'adventices). Sous chaque arbre sont présentés des tableaux contenant les valeurs prises par chaque facteur. Ces valeurs ont été fixées grâce à l'analyse bibliographique. La liste complète des références bibliographiques utilisées pour l'étude de l'impact des facteurs et permettant d'argumenter les choix d'attributs et de valeurs des différents sous-arbres est disponible en **Annexe 22**.

Présentation des 5 arbres satellites :

- La gestion du stock semencier (**Annexe 23**)

Les principaux facteurs agissant sur le stock semencier sont la culture précédente, la culture antéprécédente, les opérations de travail du sol associées et le climat.

- L'efficacité du désherbage en culture (**Annexe 24**)

Nous n'abordons ici que les deux principaux types de désherbage utilisés en culture de blé : le désherbage chimique et mécanique. En général, il existe deux périodes recommandées pour effectuer le désherbage : en automne avant ou après le semis et en sortie d'hiver lorsque les conditions climatiques le permettent. Les 4 attributs intermédiaires s'agrègent en un même attribut final car à chaque période l'agriculteur peut appliquer une stratégie de désherbage différente, et ne choisit pas forcément un programme « tout mécanique »/« tout chimique » ou « tout automne »/ « tout hiver ».

- L'efficacité de l'action en culture (**Annexe 25**)

Les deux actions principales d'action en culture autre que le désherbage sont le processus d'étouffement (obtenu par la compétitivité de la variété de blé, la présence d'une culture associée ou la densité de semis) et l'effet de la fertilisation azotée.

Les caractéristiques du cultivar de blé telles que la vitesse de levée, la vigueur de la croissance initiale, la vitesse et la précocité de montaison, le port étalé des feuilles et la hauteur influent sur la compétitivité des cultures et donc sur le contrôle des plantes adventices. Cependant, ce levier n'est pas toujours mobilisable aujourd'hui car ces critères ne sont pas couramment utilisés par la sélection variétale et commencent seulement à être caractérisés. Nous tenterons néanmoins de prendre cette variable d'entrée en considération dans le modèle.

- L'environnement de la parcelle (**Annexe 25**)

Il existe peu de données bibliographiques scientifiques présentant l'impact de l'assolement (% de blé aux alentours) ou des abords (fossés, haies) sur le développement des plantes adventices dans une parcelle de blé. Cependant les publications techniques préconisent un entretien des fossés et bandes enherbées afin d'éviter tout risque de contamination. Néanmoins cet élément étant difficile à mobiliser en tant que variable d'entrée du modèle, nous n'avons pas décidé de conserver cet attribut. Le seul impact environnemental qui sera pris en compte sera donc la texture du sol qui peut favoriser le développement de certaines plantes adventices.

- Effet de la date de semis (**Annexe 25**)

Les stratégies d'évitement des espèces adventices pour le blé d'hiver reposent sur un semis tardif permettant d'esquiver la flore automnale, qui peut être détruite par un travail du sol préparatoire. Les adventices de printemps seront ainsi les seules à devoir être gérées par la suite.

Ces sous-arbres satellites seront par la suite agrégés entre eux grâce à des tables d'agrégation et leur importance relative sera alors pondérée. Ils permettront le développement des 5 modules IPSIM-Wheat-Weeds. Ces modules pourront ensuite être évalués grâce à des jeux de données à l'échelle nationale.

5.1.3. Discussion

Le travail présenté est encore en cours. La conception des modèles avec les critères retenus et décrits précédemment peut encore évoluer car ils n'ont pas encore été soumis à différents experts.

- Conception

Par choix d'un modèle simple mais aussi robuste que possible et embrassant la complexité d'interactions dans les agroécosystèmes, nous avons caractérisé l'ensemble des espèces adventices à l'aide de 3 principales caractéristiques. Par exemple, il sera peut-être nécessaire de re-diviser le groupe « TAD faible » car nous avons fait l'hypothèse qu'il n'y avait pour l'instant pas de résistance connue chez les dicotylédones et que la majorité d'entre elles étaient à germination intermédiaire/superficielle. Mais, nous avons pu réaliser depuis dans de récentes publications qu'un début de résistance apparaîtrait chez le coquelicot (Kaloumenos, 2011). De même, nous avons fait le choix de ne pas prendre en compte les plantes vivaces qui lèvent majoritairement au printemps et qui n'ont donc pas une nuisibilité directe sur le rendement. En revanche ce type d'adventices peut présenter une nuisibilité primaire indirecte (gène à la récolte, enroulement, verse) et une nuisibilité secondaire (pour les récoltes suivantes) pouvant être préjudiciable à l'agriculteur (Chicouene, 2010). Il existe des difficultés pour gérer ces adventices notamment en agriculture biologique car elles possèdent des organes de conservation souterrains difficile à détruire (reproduction végétative pouvant être aggravé par les interventions mécaniques) (Arvalis, 2012b).

Certaines valeurs des attributs devront être précisées, comme par exemple la détermination de conditions climatiques favorables.

Le facteur climat est représenté par plusieurs attributs comme « conditions climatiques favorables ou défavorables au développement des espèces adventices ». La température et la pluie sont les deux facteurs principaux à prendre en compte. Les seuils de température de germination peuvent être facilement accessibles via différentes fiches de description en ligne comme Infloweb (2012), BADOMA, BAse de DONnées des MAuvaises herbes (INRA, 2000), WeedML, The Weed Markup Language (WeedMI, 2013). Reste alors à trouver les valeurs seuils de précipitation nécessaires à la germination.

La simplicité des échelles peut aussi induire des imprécisions. En effet, on remarque pour de nombreux facteurs que les valeurs qualitatives sont du type élevée/normal/faible ou favorable/défavorable. Le fait de raisonner avec des variables qualitatives discrètes peut entraîner des discontinuités lorsque les valeurs

quantitatives converties sont proches de seuils retenus. L'erreur peut être d'autant plus grande que le seuil discrimine des effets opposés d'un facteur. Prenons par exemple, le cas de la hauteur du blé : selon la bibliographie, la valeur seuil de 90 cm différencie une variété compétitive d'une variété non compétitive, donc selon le cas dans lequel on se trouve (90 cm +/- 1 cm), on a en sortie un paramètre favorable ou défavorable au développement des adventices. Pour éviter ce risque, on peut se rapprocher de la théorie citée précédemment pour le modèle IPSIM-Wheat-Brown Rust.

Une autre limite possible est de devoir concevoir un modèle simple à partir de données accessibles non seulement pour l'évaluation mais aussi pour l'utilisateur. Nous ne pouvions pas prendre en compte tous les facteurs influençant malgré leur impact reconnu dans la littérature. Par exemple dans la branche environnement, nous aurions pu prendre en considération l'entretien des abords mais cette donnée n'apparaît jamais dans nos données disponibles et sera très difficile à fournir par l'utilisateur. Encore une fois, l'objectif du modèle est d'être juste à défaut d'être précis. Il en est de même pour les aspects climatiques liés à la levée des adventices. En effet, on sait que la germination dépend de nombreux paramètres, autres que la T°C et l'humidité, comme par exemple le niveau de dormance, le taux d'oxygène ou la lumière. Cependant ces dernières données étant difficilement accessibles, nous n'en tiendrons pas compte dans le modèle.

- Au niveau de l'évaluation

Ce modèle n'a pu encore être évalué car il reste à expertiser nos arbres satellites puis à finaliser les tables d'agrégation.

Pour l'évaluation de la qualité prédictive, les données permettent de renseigner les variables d'entrée du modèle, mais également devront comporter des notations des niveaux d'infestation afin de les comparer aux sorties du modèle.

Il pourra alors se poser le problème de l'hétérogénéité des méthodes de notations et des unités retenues ainsi que la fiabilité de ces notations. Par exemple, la méthode de notation basée sur le pourcentage de recouvrement peut représenter une limite pour l'évaluation du modèle. En effet, la mesure de ce pourcentage reste subjective et peut donc varier selon les observateurs. La principale source d'erreur étant la confusion entre pourcentage de recouvrement et pourcentage d'adventice par

rapport à la culture de blé. En effet, si on regarde la végétation sous la culture, une adventice à port étalé aura un taux de recouvrement identique à une adventice à port dressé mais elle ne sera pas pour autant présente en plus grand nombre. Ainsi, il sera nécessaire de bien considérer la variable de sortie « profil de dégâts des espèces adventices » qui correspond à un risque d'infestation finale de la parcelle.

Une perspective possible de ce travail serait de confronter le modèle produit à un modèle existant. Par exemple, le modèle Florsys, représentant l'impact de différents facteurs sur l'évolution du stock semencier (Gardarin, 2007) pourrait être mobilisé pour analyser la cohérence des sorties d'IPSIM-Wheat-Weeds avec une formalisation des connaissances.

Chapitre 4. Eléments de synthèse : proposition d'une version initiale du modèle IPSIM-WHEAT, permettant de prédire le profil de dégâts sur blé d'hiver en fonction des pratiques culturales, du pédoclimat et de l'environnement de la parcelle.

1. Rappel sur la construction du modèle final

Les modèles présentés précédemment ont été construits selon la méthode IPSIM pour un seul bioagresseur (exception faite des espèces adventices regroupées en traits). Les attributs de base décrivent les pratiques culturales, le pédoclimat et l'environnement de la parcelle et permettent de simuler la sévérité finale d'un bioagresseur isolé. Or, au sein de l'agroécosystème, de nombreux bioagresseurs coexistent, dans un profil de dégâts unique dans une situation de production donnée, et ils peuvent donc se retrouver en interaction au niveau de la culture considérée. Les agriculteurs ont donc à gérer et contrôler un ensemble de bioagresseurs en interaction entre eux et chaque pratique employée contre un bioagresseur pourra affecter et influencer toute la biocénose, y compris d'autres bioagresseurs le cas échéant. L'originalité de ce travail est d'appréhender la diversité et la complexité d'un profil de dégâts (i.e. une communauté de bioagresseurs) sur blé d'hiver et donc de pouvoir analyser et simuler les sévérités possibles des principaux bioagresseurs du blé en interaction. La construction de chaque arbre (un pour chaque bioagresseur) permet dans un premier temps d'appréhender la dimension verticale (combinaison de différentes méthodes pour contrôler un bioagresseur) de la protection intégrée ; L'assemblage de ces différents arbres est réalisée en prenant en compte les interactions éventuelles entre bioagresseurs et permet ainsi d'embrasser la dimension horizontale (gestion de plusieurs populations d'ennemis) de la protection intégrée.

Dans l'objectif d'intégrer les interactions entre bioagresseurs, IPSIM calcule d'abord indépendamment la sévérité finale de chaque bioagresseur comme s'il était seul à affecter la culture. Ensuite, le modèle IPSIM va prendre en considération les interactions entre les bioagresseurs présents selon : i) leur niveau de sévérité respectif, ii) une typologie simple d'interactions possibles entre deux

bioagresseurs (soit le bioagresseur 1 facilite plus ou moins le bioagresseur 2, soit il le réduit plus ou moins, soit il n'interagit pas avec lui) (Aubertot et Robin, 2013). Le modèle va déterminer ensuite le niveau final de chaque bioagresseur en fonction de ces interactions avec les autres (Aubertot et Robin, 2013).

IPSIM-Wheat pourra fournir un autre type d'information en sortie du modèle : le niveau d'endocyclisme du profil de dégâts obtenus dans la situation de production étudiée, suivant une typologie générique utilisant 9 profils de dégâts, IP1 à IP9 (Aubertot et Robin, 2013). Cette sortie d'IPSIM peut néanmoins être précisée au niveau inférieur en termes d'espèces. Ce trait d'endocyclisme permet de refléter la dépendance des bioagresseurs présents au système de culture et plus précisément à l'historique de la parcelle. Ainsi, ce résultat est un levier important pour identifier si la stratégie de contrôle doit plutôt s'opérer au niveau de la parcelle (bioagresseurs à haut niveau d'endocyclisme) ou au niveau de l'assolement et du territoire (bioagresseurs à moyen ou faible niveau d'endocyclisme).

2. Application du modèle IPSIM-WHEAT dans une situation de production donnée

Seul le modèle IPSIM-Wheat-Eyespot a été évalué, les autres modèles, faute de temps, sont en cours d'évaluation. Néanmoins, nous proposons une application du modèle IPSIM-Wheat pour 3 communautés de bioagresseurs très souvent observées dans les parcelles de blé du sud de la France : l'association Rouille brune/Fusariose d'une part et Rouille brune/Septoriose d'autre part, et la combinaison de trois maladies, Rouille brune/Septoriose/Fusariose. Pour ces 3 profils, nous nous proposons d'analyser les sorties du modèle pour différentes situations de production contrastées : dans un premier temps, évaluer le niveau respectif de chaque bioagresseur pondéré de l'effet de l'autre bioagresseur et dans un second temps établir une typologie du profil de dégâts selon son niveau d'endocyclisme. Ces simulations seront réalisées grâce à des données issues de suivis en parcelles agricoles en Midi-Pyrénées.

2.1. Application d'IPSIM-WHEAT pour une situation de production à dégâts de Rouille brune/fusariose (Sud-ouest de la France)

2.1.1. Analyse de l'interaction rouille brune/fusariose

L'analyse fréquentielle des épidémies montre que les fortes épidémies de rouille brune affectent régulièrement l'ouest et le sud-ouest de la France (Délos, rapports nationaux annuels maladies foliaires des céréales, communication personnelle). Dans ces régions, 12 années sur 16 sont menacées et la baisse de rendement mesurée par rapport aux témoins traités est alors de 40% (23q.ha⁻¹ en moyenne de perte de rendement en 2007, année de très forte épidémie).

La fusariose (FHB, *Fusarium* Head Blight) dont l'agent principal responsable est *Fusarium graminearum* est l'une des maladies fongiques les plus graves des céréales réduisant le rendement en grain et sa qualité (Landschoot, 2013,). Cette maladie des épis touche toutes les céréales à paille et le maïs, mais le blé dur est la céréale la plus affectée (Tittlemier, 2013) et la filière est très exigeante sur la qualité des grains et particulièrement sur le respect des normes pour les mycotoxines. Le blé dur est cultivé essentiellement dans les régions du Sud-ouest et Sud- Est de la France et le contrôle de la fusariose y est une préoccupation majeure (Arvalis, 2013c).

Ces 2 maladies surviennent donc très régulièrement dans les mêmes parcelles et sur les mêmes plantes et l'agriculteur est très souvent confronté à des dégâts de ces 2 bioagresseurs la même année. La rouille brune est favorisée par un hiver doux et un printemps chaud et humide alors que la fusariose se manifeste à la faveur d'un mois de juin doux et pluvieux (stade floraison du blé). Par contre, les organes touchés ne sont pas les mêmes puisque la rouille brune n'affecte que les feuilles et les tiges quand la fusariose due à *F.graminearum* affecte les épis. On peut donc penser qu'aucune interaction n'existe entre ces 2 maladies et qu'aucun effet de facilitation ou de réduction n'intervient entre elles. Certes, la réduction de la surface verte due à la maladie foliaire entraîne une diminution de la photosynthèse et une accélération de la sénescence des tissus hôtes et donc aussi une diminution du remplissage des

épis (Roelfs, 1992). Indirectement, ce mécanisme pourrait influencer le niveau d'attaque de la fusariose sur les épis en l'aggravant. En effet, une plante déjà attaquée par un bioagresseur est plus sensible et vulnérable et ceci peut la prédisposer à d'autres attaques ultérieures (Johnson, 1990). Dans ce cas, la présence de la rouille brune favoriserait les dégâts dus à la fusariose. Mais aucune référence scientifique n'a été identifiée pour étayer cette hypothèse et nous ne sommes pas en mesure de pouvoir quantifier ces effets. Le profil de dégâts final sera donc le même que pour celui des deux bioagresseurs seuls pris individuellement.

2.1.2. *Modélisation du profil de dégâts rouille brune/fusariose dans une situation donnée*

➤ Structure de l'arbre et des attributs

La structure d'IPSIM-WHEAT permettant de prédire le profil de dégâts pour les deux maladies rouille brune et fusariose est présentée sur la **figure 33**. Après avoir calculé la sévérité pour chacune des deux maladies, le modèle intègre les interactions possibles pour déterminer le niveau de dégâts final du profil. Dans ce cas précis, aucune interaction n'a été retenue et le résultat final en terme de sévérité est équivalent à celui des 2 maladies prises isolément.

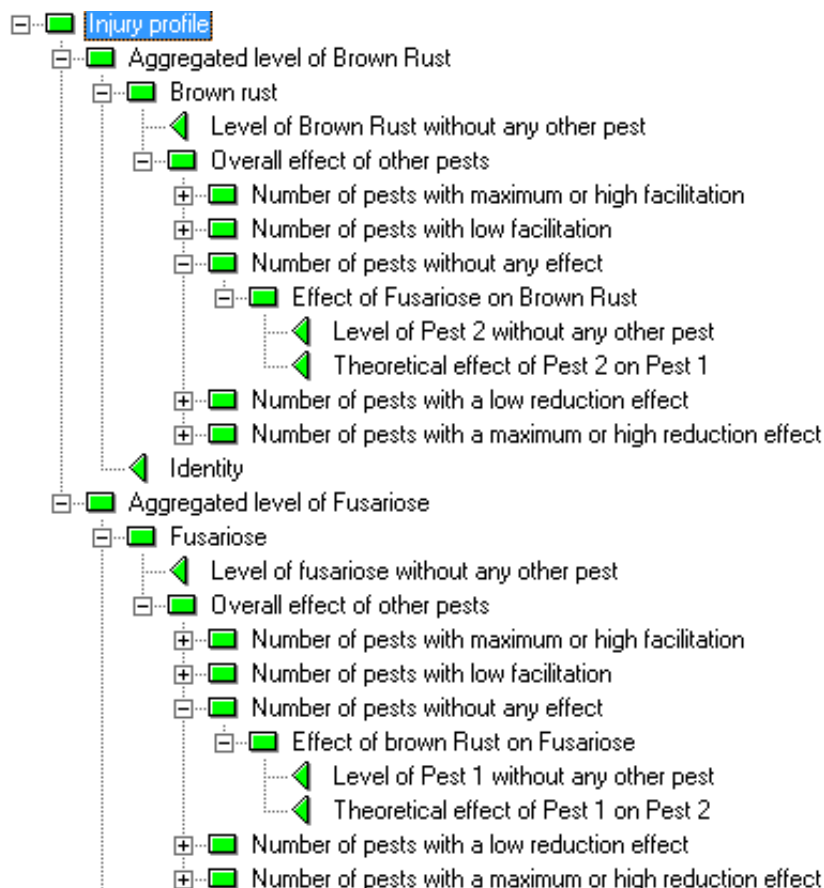


Figure 33 : Structure d'IPSIM-Wheat, rouille brune/fusariose en interaction

➤ Typologie du profil de dégâts simulé

Une autre information peut être obtenue sur le niveau d'endocyclisme du profil de dégâts en prenant en compte les interactions (**Figure 34**) et donc sur les stratégies de contrôle à privilégier. Dans ce cas, nous allons analyser le niveau d'endocyclisme d'un profil de dégâts constitué par une maladie fortement endocyclique, la Fusariose (très forte dépendance de l'historique de la parcelle (i.e. l'interaction entre la culture précédente et du travail du sol) et par une maladie faiblement endocyclique, la rouille brune (maladie aérienne, très peu dépendante de l'endo-inoculum de la parcelle).

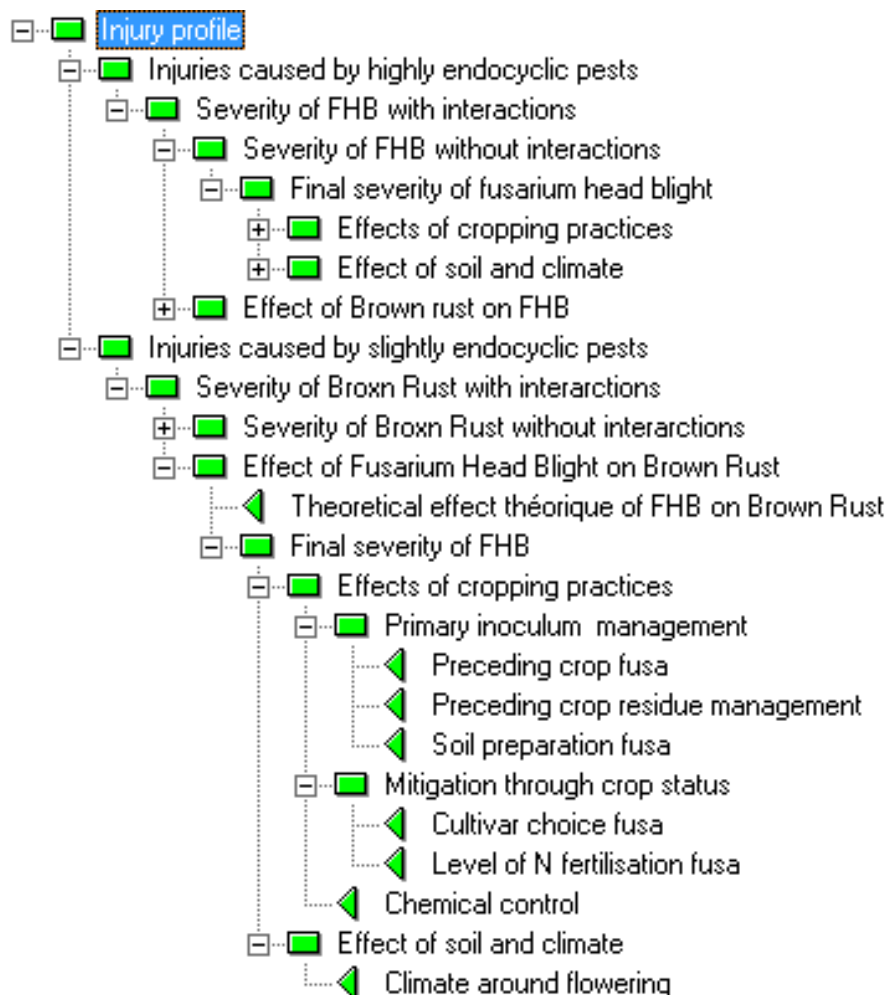


Figure 34 : Structure d'IPSIM-Wheat, rouille brune/fusariose en interaction et niveau d'endocyclisme

➤ Résultats de la simulation pour 3 systèmes de culture

Nous allons utiliser des données issues de diagnostics réalisés sur des parcelles agricoles de Midi-Pyrénées en 2013 pour simuler des scénarios de gestion (Thomas, 2013). Trois systèmes de culture contrastés vont être choisis pour prédire les profils de dégâts finaux (**Figure 35**). Un système intensif avec une rotation courte blé dur/maïs et un niveau d'intrants élevé, un système intégré avec une rotation plus longue et une utilisation plus limitée des intrants et enfin un système en AB caractérisé par un faible niveau d'intrants, une rotation longue et des variétés plus résistantes. Pour ces trois systèmes, la situation de production est la même, soit la même année 2013, la même région agricole (le Lauragais) et les mêmes conditions climatiques (Arvalis, 2013c).

Les résultats du modèle ne fournissent pas d'information sur les dommages et pertes potentielles de rendement et ne contribuent pas à fournir des propositions directes pour l'adaptation des pratiques culturales. Néanmoins, ces simulations permettent d'établir un diagnostic en terme de développement des 2 maladies pour les 3 systèmes simulés et d'analyser quels facteurs contribuent le plus à définir le profil final. Ainsi, des recommandations en terme d'adaptation de la stratégie de contrôle peuvent être suggérées, et l'échelle d'intervention la plus pertinente conseillée.

➤ Le système intensif aboutit aux profils :

- IP4 : niveau final moyen de dégâts dus au bioagresseur fortement endocyclique (la fusariose) associé à un niveau faible de dégâts dus au bioagresseur faiblement endocyclique (la rouille brune). Pour ce système, le modèle suggère qu'une meilleure gestion préventive de la fusariose doit être recherchée (en effet, le précédent est très favorable, la variété est assez sensible) ainsi qu'une meilleure prévention de la rouille brune par l'utilisation d'une variété peu sensible et un décalage de la date de semis.

- et IP6 : niveau final moyen de dégâts dus au bioagresseur fortement endocyclique (la fusariose) associé à un niveau élevé de dégâts dus au bioagresseur faiblement endocyclique (la rouille brune). La même attention doit

être portée au contrôle prophylactique de la fusariose (pas d'inversion du sol, variété sensible, niveau élevé d'azote).

- Le système intégré conduit aux profils IP1 : niveau final faible de dégâts dus au bioagresseur fortement endocyclique (la fusariose) associé à un niveau faible de dégâts dus au bioagresseur faiblement endocyclique (la rouille brune). Dans ces systèmes, le choix de mesures culturales préventives comme l'adoption de variétés peu sensibles et un contrôle chimique minimum a permis de limiter les dégâts des deux maladies.
- Le système AB conduit aux profils IP1 comme décrits précédemment : Dans ces systèmes, la bonne gestion des deux maladies s'est faite en adoptant le maximum des mesures prophylactiques à effet partiel mais dont la combinaison a permis de minimiser les dégâts.

Option	Intensive duphy	Intensive Bareil	Integrated Beziat	Integrated Auriol	Organic Fredes	Organic De Martin
Injury profile	IP6	IP4	IP1	IP1	IP1	IP1
Injuries caused by highly endocyclic pests	medium	medium	slight	slight	slight	slight
Severity of FHB	medium	medium	low	low	low	low
Final severity of fusarium head blight	3-5	3-5	0-3	0-3	0-3	0-3
Effects of cropping practices	Moderately favorable	Moderately favorable	Unfavorable	Unfavorable	Unfavorable	Unfavorable
Primary inoculum management	Moderately favorable	Unfavorable	Unfavorable	Unfavorable	Unfavorable	Unfavorable
Preceding crop	Very favorable	Neutral	Neutral	Neutral	Neutral	Neutral
Preceding crop residue management	Chopped and restitued	Chopped and restitued	Chopped and restitued	Chopped and restitued	Chopped and restitued	Restitued without chop
Soil preparation	Inversion tillage	Non inversion tillage	Direct sowing	Direct sowing	Non inversion tillage	Inversion tillage
Mitigation through crop status	Favorable	Favorable	Unfavorable	Unfavorable	Unfavorable	Unfavorable
Cultivar choice	Moderately susceptible	Moderately susceptible	Low susceptible	Low susceptible	Low susceptible	Low susceptible
Level of N fertilisation	Balanced level	Excess level	Balanced level	Balanced level	Balanced level	Low level
Chemical control	One	None	One	One	None	None
Effect of climate	Favorable	Favorable	Favorable	Favorable	Favorable	Favorable
Climate around flowering	Favorable	Favorable	Favorable	Favorable	Favorable	Favorable
Injuries caused by slightly endocyclic pests	severe	slight	slight	slight	slight	slight
Identity	1	1	1	1	1	1
Severity of brown rust without any other pest	high	low	low	low	low	low
Final severity of brown rust	40-60	0-20	0-20	0-20	0-20	0-20
Effect of cropping practices	Moderately favourable	Unfavourable	Unfavourable	Unfavourable	Unfavourable	Unfavourable
Primary inoculum management	Unfavourable	Unfavourable	Unfavourable	Unfavourable	Unfavourable	Unfavourable
Preceding crop	Non host	Non host	Non host	Non host	Non host	Non host
Rainfall amount during the fallow period	Unfavourable	Unfavourable	Unfavourable	Unfavourable	Unfavourable	Unfavourable
Soil preparation	Destruction of volunteers	Destruction of volunteers	Non destruction of volunteers	Non destruction of volunteers	Destruction of volunteers	Destruction of volunteers
Escape: effects of the sowing date	Early sowing	Normal sowing date	Late sowing	Normal sowing date	Late sowing	Late sowing
Mitigation through crop status	Very favourable	Favourable	Moderately favourable	Moderately favourable	Unfavourable	Unfavourable
Cultivar choice	Very susceptible to susceptible	Moderately susceptible	Moderately susceptible	Moderately susceptible	Quite to very resistant	Quite to very resistant
Level of N fertilisation	Balanced level	Excess level	Balanced level	Balanced level	Balanced level	Balanced level
Sowing rate	Normal	Normal	Normal	Normal	High	High
Chemical control efficacy	Good control efficacy	Average control efficacy	Average control efficacy	Average control efficacy	Low control efficacy	Low control efficacy
Fungicide T2 efficacy	good efficacy	Average efficacy	Average efficacy	Average efficacy	low efficacy or 0 treatme	low efficacy or 0 treatment
number of fungicide treatment furher T2	0	0	0	0	0	0
Effects of soil and climate	Very favourable	Very favourable	Very favourable	Very favourable	Very favourable	Very favourable
Spring climate	Very favourable	Very favourable	Very favourable	Very favourable	Very favourable	Very favourable
Interactions with the rest of the territory	Neutral	Neutral	Neutral	Neutral	Neutral	Neutral
Primary inoculum sources	Normal	Normal	Normal	Normal	Normal	Normal

Figure 35 : Exemple de simulations d'IPSIM-Wheat rouille brune/fusariose pour trois systèmes de culture

2.2. Application d'IPSIM-WHEAT à une situation de production à dégâts de Rouille brune/Septoriose dans le Sud-ouest de la France

2.2.1. Analyse de l'interaction rouille brune/septoriose

La rouille brune et la septoriose sont deux maladies foliaires dont les mêmes organes (feuilles et tiges) peuvent être attaqués. Les conditions climatiques favorisantes ne sont pas identiques, puisque la septoriose est beaucoup moins exigeante en température, mais nécessite une humidité saturante. Néanmoins, les deux maladies peuvent survenir ensemble et être présentes sur les mêmes feuilles (comme en 2013 en Midi-Pyrénées, Arvalis 2013c).

Des bioagresseurs attaquant les mêmes organes d'une plante entrent en compétition pour les mêmes ressources : dans le cas de deux champignons phytopathogènes, la surface attaquée par chaque champignon sera alors plus petite que la surface attaquée si le champignon était seul. La présence d'une des deux maladies peut alors diminuer l'intensité de l'autre.

Dans le cas de la rouille brune, les principales maladies foliaires entrant en compétition pour les mêmes ressources sont les septorioses causées par *Septoria tritici* et *S. nodorum* et l'oïdium causée par *Erysiphe graminis*. L'interaction de la rouille brune et de la septoriose est la plus étudiée.

Plusieurs travaux (Chester, 1944 ; Robert, 2004) montrent une réduction de la surface foliaire attaquée par les rouilles brunes ou jaunes en présence de la septoriose. Van der Wal *et al.* (1970) montrent que les symptômes dus à la septoriose sont plus importants lorsque les plantes sont infectées par *P. triticina*. De plus, la perte de rendement causée par l'interaction entre les deux champignons est plus élevée que la somme des pertes causées par chaque champignon seul.

Ces travaux semblent montrer que l'interaction entre ces deux maladies engendrerait une augmentation des dégâts dus à la septoriose et une diminution des dégâts dus à la rouille, tout en augmentant l'intensité du profil de dégât final.

2.2.2. Modélisation du profil de dégâts rouille brune/septoriose dans une situation donnée

➤ Structure de l'arbre et des attributs

La structure d'IPSIM-WHEAT permettant de prédire le profil de dégâts pour les deux maladies rouille brune et septoriose est présentée dans la **Figure 36**. Cette version d'IPSIM-Wheat calcule donc d'abord la sévérité pour chacune des deux maladies prises isolément puis les interactions possibles et décrites précédemment sont prises en considération pour calculer le niveau de dégâts final du profil. Un effet de facilitation faible de la rouille brune sur la septoriose va donc être retenu ainsi qu' un effet de réduction faible de la septoriose sur la rouille brune.

Comme précédemment, les sorties du modèle sont de deux ordres : soit une information en terme de sévérité finale pour chaque maladie pondérée par les interactions éventuelles (**Figure 36**), soit une information en terme de niveau d'endocyclisme du profil de dégâts final, interactions comprises (**Figure 37**).

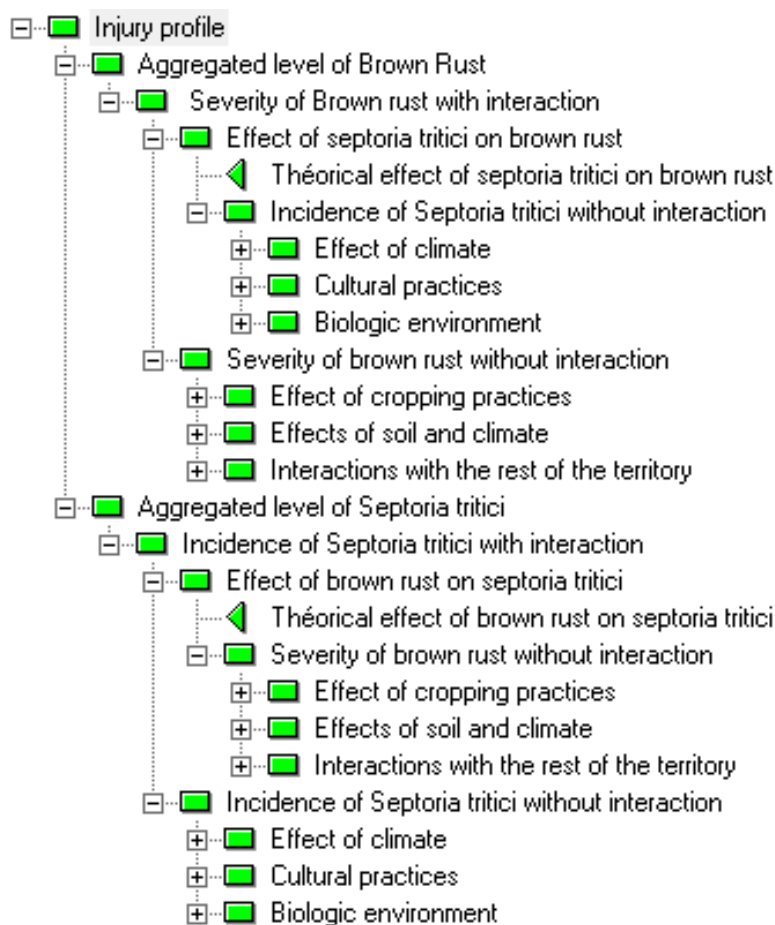


Figure 36 : Structure d'IPSIM-Wheat, rouille brune/septoriose en interaction

➤ Typologie par niveau d'endocyclisme

Dans ce scénario, nous allons étudier le niveau d'endocyclisme d'un profil de dégâts constitué par une maladie fortement endocyclique, la septoriose et par une maladie faiblement endocyclique, la rouille brune et en tenant compte des interactions existantes entre ces deux maladies foliaires.

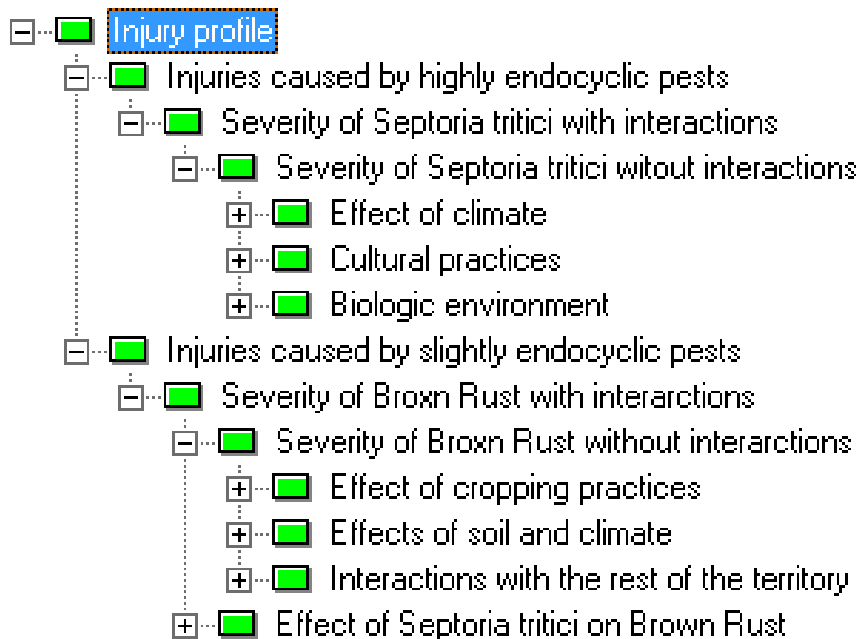


Figure 37 : Structure d'IPSIM-Wheat, rouille brune/septoriose en interaction

➤ Résultats de la simulation pour 3 systèmes de culture

Les mêmes systèmes de culture que ceux utilisés dans la précédente simulation, en région Lauragais et pour la campagne 2012-2013, ont été mobilisés pour simuler les profils de dégâts dus à la septoriose et à la rouille brune en interaction.

Les résultats des simulations permettent de prédire les niveaux de sévérité de chaque maladie pondérés par les effets possibles de l'une sur l'autre. De plus, un niveau d'endocyclisme pour chaque système simulé peut être déterminé. Ceci permet de caractériser la dépendance de chaque système à l'historique de la parcelle et aux pratiques culturales associées (**Figure 38**).

Option	Intensive duphy	Intensive Bareil	Integrated Beziat	Integrated Auril	Organic Fredes	Organic De Martin
Injury profile	IP2	IP7	IP1	IP1	IP1	IP1
Injuries caused by highly endocyclic pests	slight	severe	slight	slight	slight	slight
Severity of Septoria tritici with interactions	Faible sévérité	Forte sévérité	Faible sévérité	Faible sévérité	Faible sévérité	Faible sévérité
Severity of Septoria tritici without interactions	0-20	40-60	0-20	0-20	0-20	0-20
Effect of climate	Very favorable	Very favorable	Very favorable	Very favorable	Very favorable	Very favorable
Autumn-Winter	Favorable	Favorable	Favorable	Favorable	Favorable	Favorable
Spring	Very favorable	Very favorable	Very favorable	Very favorable	Very favorable	Very favorable
Cultural practices	Unfavorable	Moderately	Unfavorable	Unfavorable	Unfavorable	Unfavorable
Primary inoculum management	Favorable	Unfavorable	Unfavorable	Moderately	Unfavorable	Unfavorable
Pre-previous crop	Host	Host	Non host	Host	Non host	Non host
Previous crop	Non host	Non host	Non host	Non host	Non host	Non host
Tillage of the pre-previous crop	Inversion	No-inversion and crushing	Non-inversion	Non-inversion	No-inversion and crush	Inversion
Tillage of the previous crop	Inversion	No-inversion and crushing	Non-inversion	Non-inversion	No-inversion and crush	Inversion
Escape: effect of the sowing date	Early	Normal	Late	Normal	Late	Late
Mitigation through crop status	Moderately	Favorable	Moderately	Moderately	Unfavorable	Unfavorable
Cultivar choice	Moderately	Favorable	Moderately	Moderately	Unfavorable	Unfavorable
Variety	Moderately susceptible	Very susceptible to susce	Moderately susceptible	Moderately susceptible	Quite to highly resistan	Quite to highly resistant
Varietal mixture	No	No	No	No	No	No
Nitrogen fertilization	Balanced level	Excess level	Balanced level	Balanced level	Balanced level	Balanced level
Sowing density	Normal	Normal	Normal	Normal	High	High
Fungicide protection	Efficient	Moderately efficient	Moderately efficient	Efficient	Unefficient	Unefficient
Biologic environment	Unfavorable	Unfavorable	Unfavorable	Unfavorable	Unfavorable	Unfavorable
Primary inoculum sources	Moderately	Moderately	Moderately	Moderately	Moderately	Moderately
Wheat in the cropping system	Moderately	Moderately	Moderately	Moderately	Moderately	Moderately
Injuries caused by slightly endocyclic pests	medium	slight	slight	slight	slight	slight
Severity of Broxn Rust with interactions	Sévérité moyenne	Très faible sévérité	Très faible sévérité	Très faible sévérité	Très faible sévérité	Très faible sévérité
Severity of Broxn Rust without interactions	40-60	0-20	0-20	0-20	0-20	0-20

Figure 38 : Exemple de simulations d'IPSIM-Wheat rouille brune/septoriose pour trois systèmes de culture

Le système intensif aboutit aux profils IP2 et IP7, donc avec une maîtrise moyenne du bioagresseur faiblement endocyclique (la rouille brune), voire une maîtrise insuffisante du bioagresseur fortement endocyclique (la septoriose).

Les systèmes intégré et AB conduisent au profil IP1, comme pour la simulation précédente rouille brune /fusariose : la maîtrise des deux bioagresseurs est bonne, grâce à la mobilisation de mesures préventives et à un contrôle chimique efficace pour le système intégré.

2.3. Application d'IPSIM-WHEAT pour une situation de production avec incidence de dégâts de 3 maladies : Rouille brune/Septoriose/Fusariose dans le Sud-ouest de la France

Cette combinaison de 3 maladies est une conjonction très réaliste dans la région Lauragais et l'année 2013 en est un très bon exemple (Arvalis, 2013c). La **Figure 39** décrit la structure permettant de prédire les sévérités finales et d'en déduire les profils de dégâts finaux.

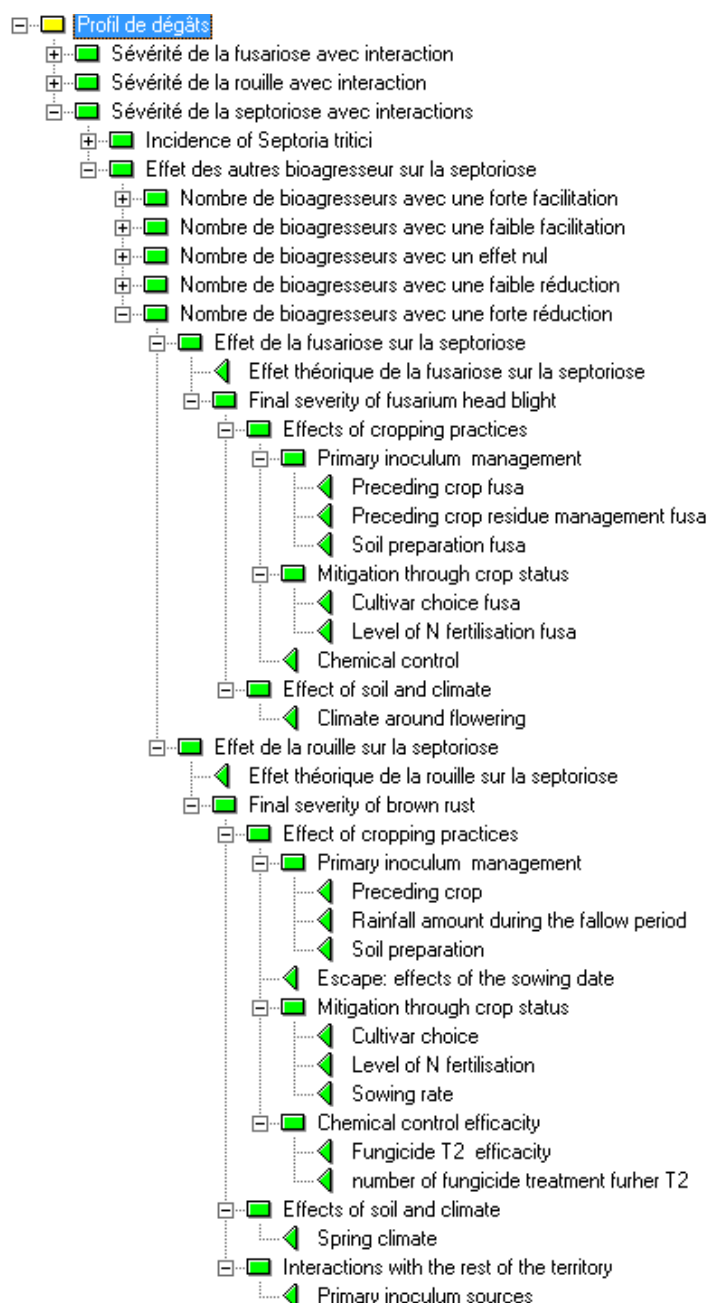


Figure 39 : Structure d'IPSIM-Wheat, fusariose/rouille brune/septoriose en interaction

Une limite possible de cette simulation à 3 bioagresseurs est que toutes les interactions ne sont complètement pas prises en compte. En effet, 6 interactions sont bien décrites, entre chacun des 3 bioagresseurs et les 2 autres ; mais, un bioagresseur affecté par un autre n'interagira peut-être pas de façon similaire envers les deux autres s'il n'avait pas subi au préalable cette première attaque. Cette limite est similaire à celle rencontrée en physique lors de l'étude d'interactions entre trois corps (Sundman, 1912).

Les trois applications précédentes permettant de simuler des profils de dégâts en utilisant une description simple mais robuste de la diversité des pratiques dans une situation de production donnée ont été réalisées à une échelle régionale et pour des scénarii réalistes. A l'avenir, le modèle IPSIM-Wheat pourra intégrer l'ensemble des 12 bioagresseurs majeurs touchant le blé d'hiver ce qui permettra de dresser, par situation de production, une typologie de profils de dégâts dus à des communautés de bioagresseurs en interaction.

Quatrième partie. Discussion et perspectives

1. Originalités, intérêts et limites de IPSIM-Wheat

Le modèle IPSIM-Wheat a pour objectif de prédire les profils de dégâts sur blé d'hiver en utilisant le schéma conceptuel et la démarche de modélisation d'IPSIM (Aubertot et Robin, 2013). Il rassemble différents modules développés pour les principaux bioagresseurs du blé d'hiver. Sa construction se base sur les connaissances disponibles dans la littérature scientifique et technique (données expérimentales, connaissances et modèles) et l'expertise. Il permettra de concevoir des systèmes de culture moins sensibles aux pressions biotiques et donc moins dépendants des pesticides et de caractériser le niveau de performance de parcelles agricoles.

La principale avancée de ce modèle est de pouvoir appréhender un niveau élevé de complexité au sein des agroécosystèmes de façon simple. Vouloir embrasser ce niveau de complexité entraîne des compromis. Ainsi, a-t-il été jugé utile de préférer la justesse plutôt que la précision pour les variables prédites.

Les originalités qui en découlent sont de plusieurs ordres :

- L'échelle de temps retenue n'englobe pas la totalité de la succession des cultures, mais néanmoins le précédent et l'antéprécédent sont considérés et permettent d'intégrer correctement pour les bioagresseurs du blé l'influence de l'historique de la parcelle.
- L'échelle d'espace dépasse la parcelle pour appréhender des niveaux supra-parcellaires en considérant la proportion de blé dans les assolements régionaux ainsi que la proportion de ZCE (Zone de Compensation Ecologique) dans le paysage. Le formalisme retenu est spatialement non explicite.
- La dimension horizontale de la PIC a été intégrée dans ce travail puisque nous avons pris en compte un ensemble de bioagresseurs en interaction ; de même, la dimension verticale de la PIC, soit la combinaison d'un ensemble de pratiques est au cœur de la démarche de modélisation. Une des innovations majeures est donc d'avoir amélioré la prise en compte de ces deux intégrations, en analysant les interactions existantes dans un agroécosystème, non seulement au sein de la communauté de bioagresseurs

et entre les différentes pratiques culturales, mais également entre les pratiques combinées, le pédoclimat, le paysage et les profils de dégâts.

- Une innovation majeure est de proposer une typologie des dégâts par un trait simple mais pertinent pour la gestion des bioagresseurs : le niveau d'endocyclisme. Cette information dégrade certes l'information spécifique sur les bioagresseurs mais permet d'avoir une approche transversale, plus pertinente dans le contexte d'une gestion globale d'un ensemble de bioagresseurs en interaction. Le diagnostic et le niveau d'intervention sur lequel porter le travail de l'agriculteur est alors très rapidement lisible. Cette approche pourrait également, par son caractère générique, contribuer à fournir une information sur le niveau d'endocyclisme de l'ensemble du système de culture permettant ainsi des analyses transfilières.

La conception et le développement du modèle IPSIM-Wheat présentent de nombreux intérêts qui se retrouvent aussi bien dans le choix de sa construction que de son évaluation :

- La construction de l'ensemble des modules a permis de mobiliser et de synthétiser les connaissances existantes à ce jour dans la bibliographie sur les effets des interactions entre pratiques culturales/pédoclimat/paysage sur les profils de dégâts.

- Le choix d'une démarche de modélisation qualitative permet de pouvoir appréhender un niveau de complexité élevé.

- Le modèle permet d'agréger des informations de natures différentes (variables ordinales, nominales et variables d'intervalle) et d'origines très diverses (résultats expérimentaux, modèles existants, expertises, diagnostics en parcelles agricoles) ce qui est rarement possible pour les formalismes classiques de modélisation.

- La construction du modèle offre une grande souplesse d'adaptation et le modèle est très facilement évolutif.

- De plus, sa structure est générique et IPSIM peut se décliner sans grande modification pour d'autres cultures annuelles ou pérennes, en plein champ ou sous abris.

- L'évaluation des modules d'IPSIM-Wheat a permis d'identifier et de recenser toutes les sources de données disponibles au niveau national regroupant à la fois des descripteurs sur les pratiques culturales et sur les sévérités des bioagresseurs (Cholez, 2011).

- Le modèle IPSIM-Wheat n'est pas encore opérationnel mais certains modules le sont déjà. L'évaluation de la qualité prédictive du modèle peut se faire en comparant les écarts de prédiction entre classes observées et simulées ou associant des valeurs numériques aux classes de sévérité prédites. Dans le second cas, les critères classiques de caractérisation de la performance prédictive des modèles ont été utilisés. Des techniques statistiques supplémentaires pourront être mobilisées pour analyser ce type de données catégorielles (Agresti, 2002). L'évaluation du premier module construit, simulant la sévérité du piétin-verse, a donné des résultats prometteurs, même si des marges de progrès existent encore. Il est important de souligner que cette évaluation jugée comme satisfaisante a été réalisée sans ajustement préalable ce qui est remarquable et atypique par rapport aux démarches de modélisation habituelles.

La qualité prédictive du modèle sera améliorée par ajustement d'une combinaison de lignes des tables d'agrégation définie à l'aide d'un algorithme minimisant un critère de caractérisation de la qualité de prédiction : la RMSEP (Wallach et al., 2002). Ceci nécessitera un travail d'optimisation du code informatique pour implémenter un algorithme en langage bas niveau (C) compte tenu du nombre très élevé de simulations à réaliser (10^{68} dans le cas de la rouille brune ; Aubertot, 2013).

Néanmoins, certaines limites liées à la conception d'IPSIM-Wheat existent et peuvent servir à identifier des pistes d'amélioration.

- On peut reprocher au modèle son manque de précision tant dans le nombre des attributs ou des échelles que dans le nombre de classes de sortie du modèle, mais c'est le prix à payer pour pouvoir représenter l'ensemble des interactions existantes au sein d'un système complexe. Certes, nous pourrions augmenter le nombre de classes pour apprécier les attributs mais les tables d'agrégation deviendraient alors trop difficiles à renseigner.

- De même, la transformation des variables quantitatives en variables qualitatives pourrait apparaître subjective. Néanmoins, cette transformation est réalisée de manière automatique à l'aide de tables de décision, en général issues de la littérature technique. Des références régionales ont été mises en forme pour permettre une transformation automatique sous tableur (**Annexe 26**). De même, la définition des tables d'agrégation, même si elle mobilise des références scientifiques et techniques, nécessite un certain niveau d'expertise et entraîne donc une certaine subjectivité. C'est en partie pour cette raison que le nombre maximum de valeurs possibles prises par les attributs est limité à 5 pour ne pas aboutir à des tables d'agrégation trop grandes et difficiles à renseigner. A ce niveau, des interventions d'experts ont permis d'étayer les tables d'agrégation de manière collective. C'est une autre originalité de la démarche.

- Le modèle IPSIM-Wheat ne prend pas en compte les facteurs socio-économiques, ni les objectifs et contraintes de l'agriculteur, ce qui peut être une limite dans l'analyse des performances des agroécosystèmes considérés. Néanmoins, la complexité de l'agroécosystème est déjà grande et l'objectif du modèle est *per se* déjà ambitieux. IPSIM-Wheat est développé dans le cadre d'un couplage avec d'autres modèles qui permettra la conception de systèmes de culture (**Figure 40**).

- De même, le modèle ne prend pas en considération les facteurs difficiles à renseigner ou ceux pour lesquels il n'existe pas de consensus au niveau de la littérature (par exemple, la densité de graminées dans les abords des champs). En fonction de l'évolution des connaissances, certains attributs pourront néanmoins être intégrés dans la structure.

- Le choix a également été fait de ne pas retenir comme variables d'état du modèle les états de peuplement de la culture, ce qui aurait alourdi la structure du modèle. Néanmoins, ces états sont indirectement pris en compte dans l'appréciation de certains attributs (par exemple, la vigueur de la plante est indirectement considérée avec les variables fumure azotée et densité de semis).

- IPSIM-Wheat n'est pas un modèle dynamique mais un modèle statique, ce qui peut-être une limite pour un couplage avec un modèle dynamique. Mais une transformation des sorties statiques d'IPSIM peut facilement être envisagée en

associant aux classes qualitatives prédites des dynamiques génériques (e.g. avec le modèle de Van der Plank, 1963).

- Une limite importante du modèle IPSIM tient aussi dans le fait qu'il ne prédit que des profils de dégâts et non des dommages. Il ne permet donc pas d'évaluer les performances agronomiques en termes de rendement.

Ce travail de modélisation, innovant tant du point de vue méthodologique que par les enjeux scientifiques sous-jacents est l'un des premiers réalisés dans le cadre d'une approche réellement systémique pour la conception de systèmes de culture basées sur la PIC.

2. L'approche systémique, une innovation nécessaire en PIC

Les dimensions horizontale (gestion de plusieurs populations de bioagresseurs) et verticale (combinaison des méthodes de gestion des bioagresseurs) de la protection intégrée ne sont que trop peu étudiées. Du fait de la spécialisation et du cloisonnement disciplinaire, les travaux systémiques pour la protection intégrée des cultures (PIC) sont trop rares. Au niveau agronomique, les effets d'une combinaison de méthodes culturales sur le contrôle des bioagresseurs ne sont que trop peu étudiés. En effet, au-delà des études analytiques décrivant les cycles épidémiques des populations de bioagresseurs, les travaux publiés sur la manière de contrôler ces populations portent généralement sur l'effet d'une méthode de contrôle à effet partiel (par exemple, la sensibilité variétale ou la date de semis). Or, les pratiques culturales agissent le plus souvent en interrelation pour limiter ou favoriser le développement des ennemis des cultures et une seule pratique peut suffire à affecter l'ensemble de la biocénose de l'agroécosystème piloté. Il apparaît donc nécessaire d'intégrer les différents leviers de maîtrise des pressions biotiques.

De même, les études identifiées dans la bibliographie, quand elles prennent en compte l'ensemble des méthodes de contrôle, ne portent alors que sur un voire deux bioagresseurs majeurs mais jamais sur une communauté d'ennemis (approche monospécifique et non plurispécifique). Ceci est loin d'être satisfaisant car les agriculteurs doivent faire face à un profil de dégâts dont les causes sont, de plus, en interaction.

Enfin, les dimensions de temps et d'espace qui sont en général considérées dans les travaux sont l'échelle de la parcelle et le cycle de culture. L'approche présentée permet d'aborder les niveaux supra –parcellaire et pluriannuels. Peu d'études et d'outils prennent donc en compte la dynamique d'un cortège de bioagresseurs, les différentes méthodes de contrôle, et les relations situations de production/dégâts/dommages. Ce type d'étude est difficile à mener, car elle entraîne une complexité des analyses et de l'interprétation. Le but est de sortir de l'idiosyncrasie pour généraliser et proposer des modèles systémiques et génériques. Ici apparaît également l'intérêt de considérer des groupes de bioagresseurs qui ont des caractéristiques communes (dans ce travail, l'endocyclisme) et de modéliser la dynamique d'associations d'organismes nuisibles plutôt que celle de pathogènes individuels.

La première innovation de ce projet consiste en l'amélioration des connaissances sur les relations entre les pratiques culturales telles que combinées par l'agriculteur, et un ensemble de bioagresseurs présents en interaction dans un système de culture et dans un paysage définis. La seconde innovation porte sur l'adoption d'un raisonnement systémique pour intégrer les différentes méthodes de gestion simultanée des différents bioagresseurs. Enfin, la dernière innovation tient en la conception d'une méthode et d'un outil permettant l'intégration verticale et horizontale de la PIC.

3. Applications en pratique et perspectives scientifiques

IPSIM-Wheat peut dans le futur permettre de proposer à la recherche ou au développement une méthode et un outil utiles à la conception de systèmes moins sensibles aux pressions biotiques et donc moins consommateurs de pesticides. Ces outils sont intéressants comme appui à des programmes de conception ou de co-conception, d'expérimentation, ou de prototypage de systèmes innovants.

IPSIM-Wheat peut aussi être un outil utilisable *a posteriori* pour diagnostiquer le niveau de performances actuelles de parcelles agricoles ou expérimentales en termes de contrôle du profil de dégâts sur le blé d'hiver.

Ce modèle est de plus un outil très intéressant de communication, animation, formation car il est très facile à prendre en main et très vite opérationnel, transparent dans toute sa construction donc facilement adaptable à d'autres cultures ou dans

d'autres situations. Son appropriation très simple est un atout qui lui confère une utilité sociale potentielle indéniable. Des interventions auprès des étudiants dans des écoles d'ingénieurs ont d'ailleurs été réalisées durant l'automne 2013 et ont contribué à faire émerger des échanges et des points de réflexion tout à fait pertinents et à même de pouvoir faire évoluer les modèles.

Des perspectives scientifiques passionnantes voient le jour :

- IPSIM par sa généricité peut facilement être adaptable à d'autres cultures et des adaptations au tournesol et au manguier sont prévues.
- IPSIM-Wheat pourrait être un outil pertinent pour discriminer les pratiques agricoles communes à une région et dresser une typologie des relations profil de dégâts /situations de production/systèmes de culture régionaux.
- Nous proposons d'utiliser le modèle IPSIM-Wheat comme outil d'analyse des impacts du changement climatique et des évolutions des pratiques agricoles sur les principaux bioagresseurs du blé d'hiver. Ces effets attendus sur les maladies fongiques aériennes sont bien documentés et l'évolution possible de la rouille brune a été étudiée avec précision (Bancal M.O., 2010; Caubel et al., 2012; West et al., 2012; Licker et al., 2013). Notre modèle pourrait donc contribuer à l'analyse des impacts sur cette maladie majeure du blé en simulant des scénarii de réchauffement moyen planétaire entre 1.1°C et 6.4°C pour le XXI siècle (Caubel et al., 2012).
- Le modèle IPSIM-Wheat pourrait être également mobilisé pour étudier les effets de l'adoption de nouvelles pratiques sur le profil de dégâts du blé d'hiver ou les effets de l'évolution des pratiques croisée à l'évolution du climat. Par exemple, nous pourrions intégrer comme variables d'entrée du modèle, les mélanges variétaux ou les mélanges d'espèces (cultures associées) ou les cultures intermédiaires. Toutes ces techniques se développent dans les assolements français et européens et la réglementation tend à les favoriser (réglementation Cultures Intermédiaires). Il apparaît donc pertinent de pouvoir simuler l'impact de l'adoption de ces techniques sur les principaux bioagresseurs du blé. On peut également penser que le verdissement futur de la PAC va entraîner des changements dans les pratiques des agriculteurs dont

la prédiction des effets sur quelques pathosystèmes majeurs peut être très judicieuse.

- Dans notre travail, nous avons fait l'hypothèse que le profil de dégâts final est déterminé par trois éléments : les pratiques culturales, le pédoclimat et l'environnement de la parcelle. Un des critères les plus difficiles à apprécier est l'effet du climat sur le développement du bioagresseur considéré. Ainsi, s'il est facile de déterminer les conditions épidémiologiques favorisant sa dynamique, les connaissances manquent (sauf sous forme de modèles le cas échéant) pour construire des règles afin de décider son niveau d'influence pour une année climatique donnée. Les données historiques des Services régionaux de la Protection des Végétaux (SRPV) sous forme de bilans nationaux, couplées à la base de données climatiques MétéoFrance SAFRAN pourront être mobilisées pour établir une typologie des effets du climat sur la sévérité d'un bioagresseur (projet SMACH HISTOPEST porté par le réseau PIC, Protection Intégrée de Cultures, INRA-CIRAD). Un premier travail a permis de synthétiser les données relatives à la rouille brune sur blé.

- A l'avenir, nous pensons utiliser d'autres sources de données pour évaluer la qualité prédictive d'IPSIM-Wheat. Ainsi, les simulations pourront être élargies en utilisant les données issues de l'action expérimentale du projet Rés0pest soit un ensemble de 7 supports expérimentaux recouvrant une large gamme de productions agricoles et permettant avant tout de concevoir, tester et évaluer des systèmes de culture en forte rupture avec ceux de l'agriculture conventionnelle, sans recours aux pesticides. Ces données sont précieuses puisqu'il s'agit certainement d'un des seuls dispositifs expérimentaux français permettant à la fois une caractérisation précise du profil de dégâts et du système de culture dans une large gamme de situations de production.

4. Couplage avec d'autres modèles : pour une conception de systèmes de culture moins sensibles aux pressions biotiques

IPSIM-Wheat ne prévoit de simuler que les profils de dégâts et non les dommages, et la présence de dégâts n'entraînent pas forcément un dommage. Or, concevoir des systèmes plus économes en pesticides nécessite de proposer des systèmes engendrant moins de pertes éventuelles dues à des bioagresseurs. De plus, un

système innovant ne doit pas seulement être plus économe en pesticides, il doit aussi être respectueux de l'environnement et viable économiquement et socialement. Un des résultats attendus est donc le couplage d'IPSIM-Wheat avec d'autres modèles (**Figure 40**) :

- avec le modèle Wheatpest (Willoquet et al., 2008) qui permet de représenter les pertes de rendement quantitatives dues aux principaux bioagresseurs du blé. Néanmoins, Wheatpest ne prévoit pas les profils de dégâts. Ceux-ci seront simulés par le modèle IPSIM-Wheat et seront donc des variables d'entrée du modèle Wheatpest. Ce couplage contribuera à évaluer les performances agronomiques en termes de dommages et de pertes économiques de systèmes testés.
- avec des modules d'évaluation des performances environnementales et économiques : Modèles MASC (Sadok et al., 2009) ou DEXiPM (Pelzer et al., 2012).
- un autre rapprochement pourrait être envisageable, celui d'IPSIM-Wheat avec un modèle facilitant l'appréciation de certaines variables d'entrée comme les données climatiques. Ainsi, le modèle STICS-MILA (Caubel et al., 2012) paramétré pour la rouille brune pourra être utilisé et testé pour analyser les séries de données climatiques des SRPV.

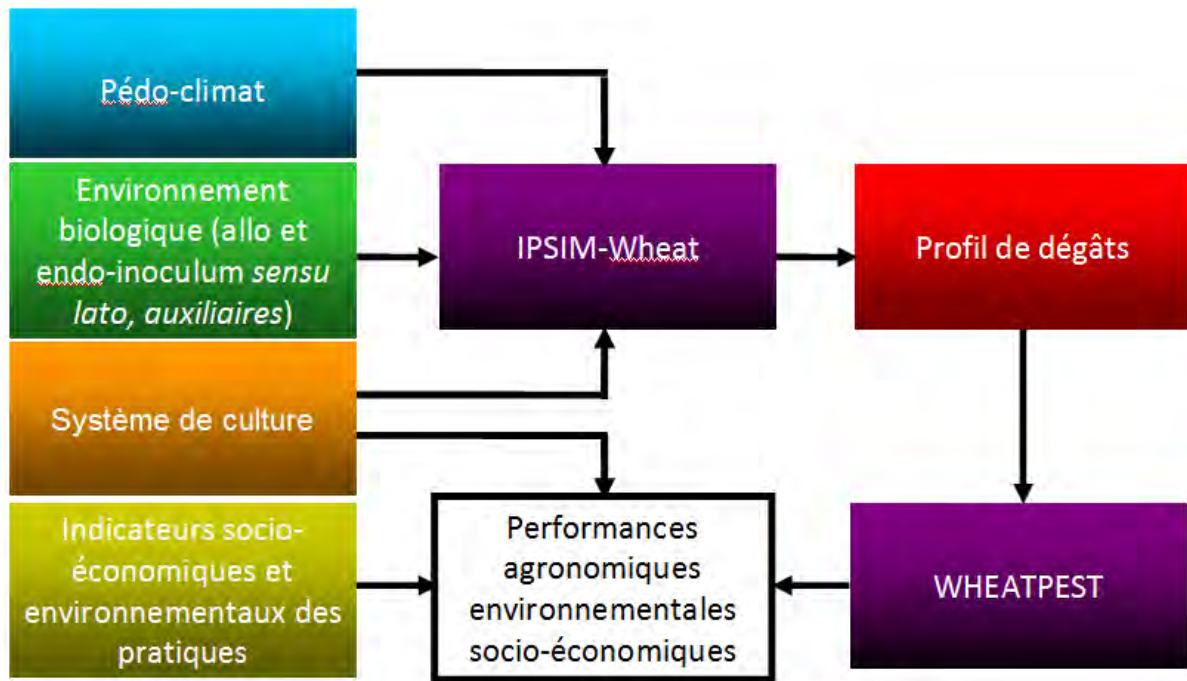


Figure 40 : Couplage d'IPSIM-Wheat avec d'autres modèles

De même, étant donné l'ergonomie très simple et facilement appropriable d'IPSIM via le logiciel DEXi, il est facile d'envisager de valoriser des modèles (ou autres outils) existants à l'INRA ou dans d'autres instituts au niveau de certaines tables d'agrégation (par exemple, la prise en compte du stock semencier de départ des adventices).

Conclusion

Le modèle IPSIM-Wheat, en cours de développement, vise à représenter de manière simplifiée et générique les relations entre le pédoclimat, les pratiques culturales effectuées sur le blé, l'environnement de la parcelle et les profils de dégâts de bioagresseurs rencontrés sur cette culture. L'approche qualitative privilégiée pour la construction de ce modèle est innovante puisqu'elle se base sur la remobilisation de la bibliographie et de l'expertise grâce à un système d'arborescence. En vue d'évaluer la qualité prédictive de ce modèle, des données de terrain sont nécessaires. Celles-ci doivent permettre de balayer une large gamme de combinaisons : contexte pédoclimatique X pratiques culturales X environnement de la parcelle X dégâts de bioagresseurs. Un constat est apparu : les réseaux permettant de regrouper des renseignements simultanés sur les pratiques et sur un cortège de bioagresseurs sont très rares ou les données peu précises. Ceci peut être un frein au développement d'études transversales, pourtant requises dans le cadre de la Protection Intégrée des Cultures. Cette situation semble néanmoins évoluer avec l'émergence de réseaux tels que le Groupe de Recherche Européen ENDURE ERG qui promeut le partage de connaissances, d'outils et de méthodes entre les acteurs de la protection des plantes.

A moyen terme, le modèle développé devrait permettre de hiérarchiser les situations de production selon leurs risques biotiques et leur niveau d'endocyclisme et par extension devenir un support à la conception de système de cultures économes en intrants. Dans cette optique, l'approche multidisciplinaire prend tout son sens. Le couplage d'IPSIM-Wheat à d'autres modèles intégrant les performances agronomiques, économiques, sociales et environnementales paraît pertinent. Car si la connaissance technique et scientifique est un socle inhérent à tout changement, la compréhension de la place des agriculteurs dans les processus d'innovation et l'identification des effets de verrouillage à l'échelle des filières est indispensable.

Références bibliographiques

- Abecassis, J., Bertrand, M., Bonny, S., Dedryver, C.A., Georget, M., Nolot, J.M., Rolland, B. et Rousset M., (2011). Voies d'amélioration des impacts environnementaux des systèmes céréaliers : une première synthèse à partir des travaux de l'INRA. *Innovations Agronomiques*, 12, 53-72.
- Abecassis, J., Bergez, J.E, Aizac, B., Charcosset, A., Dedryver, C.A., Grefeuille, V., Jacquet, F., Jez, C., Lessire, M., Rastouin, J.L., Rousset, M., (2011). Les filières céréalières. Organisation et nouveaux défis. INRA. Editions QUAE, 165 p.
- Agence bio, (2012). Les productions végétales biologiques. <http://www.agencebio.org/les-productions-vegetales-biologiques>. Consulté le 20/10/2013.
- AGPB, (2013). <http://www.agpb.com/documentation-et-publications/recoltes>. Consulté le 20/10/2013
- Agreste, (2013a). Synthèses - Grandes cultures - Céréales. Juillet 2013. Synthèse n° 2013/213. Blé et maïs : vers des bilans mondiaux 2013/2014 à nouveau excédentaires. <http://www.agreste.agriculture.gouv.fr/IMG/pdf/conjsynt213201307cult.pdf>. Consulté le 20/10/2013.
- Agreste, (2013b). Synthèses - Grandes cultures - Céréales. Mars 2013. Synthèse n° 2013/201. Cultures d'hiver : recul des soles de blé dur et de colza, aux prix moins attractifs que le blé tendre. <http://www.agreste.agriculture.gouv.fr/IMG/pdf/conjsynt201201303cult.pdf>. Consulté le 20/10/2013.
- Agreste, (2013c). Enquête sur les pratiques culturales grandes cultures en 2011. <http://agreste.agriculture.gouv.fr/enquetes/pratiques-culturales/grandes-cultures-prairies/>. Consulté le 20/10/2013.
- Agreste, (2013d). Les Dossiers n°17-juillet 2013. Enquête Pratiques culturales 2011. Les traitements phytosanitaires sur les grandes cultures, nombre de traitements http://agreste.agriculture.gouv.fr/IMG/pdf/dossier17_integral.pdf. Consulté le 20/10/2013.
- Agreste, (2013e). Pratiques culturales sur le blé tendre d'hiver en 2010/2011 Six traitements en moyenne sur le blé tendre en 2011 - Primeur N° 304. <http://www.agreste.agriculture.gouv.fr/IMG/pdf/primeur304.pdf>. Consulté le 20/10/2013.
- Agreste, (2009). La protection phytosanitaire du blé tendre. Davantage de traitements pour les cultures à hauts rendements. N°226. Juin 2009. http://www.agreste.agriculture.gouv.fr/IMG/pdf_primeur226.pdf. Consulté le 20/10/2013.
- Agresti, A. (2002). *Categorical Data Analysis*. 2nd ed. Wiley Series in Probability and Mathematical Statistics. Chichester USA. 710p.
- Agrios, G. N. (1997). *Plant pathology*. Fifth edition. Academic Press, 952 p.
- Al Hassan, D. (2012). Rôle du paysage sur la répartition et l'abondance des pucerons et de leurs prédateurs carabiques. Thèse. Université de Rennes 1 sous le sceau de l'université européenne de Bretagne 201p. http://tel.archives-ouvertes.fr/docs/00/79/43/12/PDF/These_Diab_AIHassan_2012.pdf. Consulté le 12/11/2013.
- Al-Hassan, D., Georgelin, E., Delattre, T., Burel, F., Plantegenest, M., Kindlmann, P., and Butet, A. (2013). Does the presence of grassy strips and landscape grain

- affect the spatial distribution of aphids and their carabid predators? *Agricultural and Forest Entomology* 15, 24-33.
- Anderson, R. L., and Soper, G. (2003). Review of volunteer wheat (*Triticum aestivum*) seedling emergence and seed longevity in soil. *Weed Technology* 17, 620-626.
- Anikster, Y., Bushnell, W. R., Eilam, T., Manisterski, J., and Roelfs, A. P. (1997). *Puccinia recondita* causing leaf Rust on cultivated wheats, wild wheats, and rye. *Canadian Journal of Botany* 75, 2082-2096.
- Ansar, M., Ahmed, Z. I., Ashraf, M., and Abid, R. (2007). Effect of different nitrogen levels on *Septoria tritici* development on three wheat cultivars. *Pakistan Journal of Phytopathology* 19, 7-14.
- Ansar, M., Cheema, N. M., and Leitch, M. H. (2010). Effect of agronomic practices on the development of *Septoria* leaf blotch and its subsequent effect on growth and yield components of wheat. *Pakistan Journal of Botany* 42, 2125-2138.
- Aqueel, M. A., and Leather, S. R. (2011). Effect of nitrogen fertilizer on the growth and survival of *Rhopalosiphum padi* (L.) and *Sitobion avenae* (F.) (Homoptera: Aphididae) on different wheat cultivars. *Crop Protection* 30, 216-221.
- Armour, T., Viljanen-Rollinson, S. L. H., Chng, S., Butler, R. C., Jamieson, P. D., and Zyskowski, R. F. (2004). Examining the latent period of *Septoria tritici* blotch in a field trial of winter wheat. *New Zealand Plant Protection*, Volume 57, 2004. Proceedings of a conference, Hamilton, New Zealand, 10-12 August 2004, 116-120.
- Arvalis/Chambre d'agriculture des Pays de Loire. (2006). Guide pratique désherbage céréales à paille. http://www.loireatlantique.chambagri.fr/fileadmin/documents_ca44/agronomie_cultures/cultures/guide_06_desherbages_cereales_bd.pdf. Consulté le 2/12/2013.
- Arvalis, (2012a). Maladies du blé tendre. Un climat humide autour de la floraison favorise les fusarioses. <http://www.arvalis-infos.fr/view-10191-arvarticle.html?region=Consulté> le 12/11/2013.
- Arvalis, (2012b). Connaître la biologie des vivaces pour mieux les gérer. <http://www.arvalis-infos.fr/view-11956-arvarticle.html>. Consulté le 22/11/13
- Arvalis, (2013a). Les fiches accidents céréales à paille. http://www.fiches.arvalisinfos.fr/fiche_accident/fiches_accidents.php?mode=fa&type_cul=1&type_acc=4&id_acc=42. Consulté le 12/11/2013.
- Arvalis, (2013b). Baromètre maladies céréales. <http://www.barometre-maladies.arvalis-infos.fr/bletendre/>. consulté le 12/11/2013.
- Arvalis, (2013b). Inhibiteurs de l'ALS, raisonner à l'échelle de la rotation. Arvalis/CETIOM infos. Septembre 2013.
- Arvalis-INRA-ANSES, 2013. Note commune résistance maladies céréales à pailles aux fongicides 2013. http://draaf.lorraine.agriculture.gouv.fr/IMG/pdf/Note_2013_resistances_cereales_a_paille_cle86e1c7.pdf. Consulté le 12/11/2013.
- Arvalis, (2013c). Guide Choisir et décider - Traitements et interventions de printemps des céréales : préconisations 2013-2014 <http://www.arvalis-infos.fr/cereales-a-paille-l-essentiel-des-preconisations-pour-le-printemps-2014-@/view-11516-arvarticle.html>. Consulté le 22/11/2013
- Arvalis, (2013d). <http://www.arvalis-infos.fr/la-septoriose-progresse-a-la-faveur-des-pluies-d-avril-et-mai->

@/9994/view.jspz?obj=arvarticle&id=9994&syndtype=null&hasRedirected=true Consulté le 12/11/2013.

- Asseng, S., Ewert, F., Rosenzweig, C., Jones, J. W., Hatfield, J. L., Ruane, A. C., Boote, K. J., Thorburn, P. J., Rotter, R. P., Cammarano, D., Brisson, N., Basso, B., Martre, P., Aggarwal, P. K., Angulo, C., Bertuzzi, P., Biernath, C., Challinor, A. J., Doltra, J., Gayler, S., Goldberg, R., Grant, R., Heng, L., Hooker, J., Hunt, L. A., and Ingwersen, J. (2013). Uncertainty in simulating wheat yields under climate change. *Nature Climate Change* 3, 827-832.
- Aubertot, J.-N. (2013). Mémoire d'Habilitation à Diriger les recherches. Université de Toulouse.
- Aubertot, J.-N., and Robin, M.-H. (2013). Injury Profile SIMulator, a Qualitative Aggregative Modelling Framework to Predict Crop Injury Profile as a Function of Cropping Practices, and the Abiotic and Biotic Environment. I. Conceptual Bases. *PLoS ONE* 8, e73202.
- Aubertot, J. N., Barbier, J. M., Carpentier, A., Gril, J. J., Guichard, L., Lucas, P., Savary, S., and Voltz, M. (2007). Pesticides, agriculture and the environment: reducing the utilization of pesticides and limiting their environmental impacts. *Pesticides, agriculture et environnement: Reduire l'utilisation des pesticides et en limiter les impacts environnementaux. Pesticides, agriculture et environnement: Reduire l'utilisation des pesticides et en limiter les impacts environnementaux*, 119 pp.
- Aubertot, J. N., West, J. S., Bousset-Vaslin, L., Salam, M. U., Barbetti, M. J., and Diggie, A. J. (2006). 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.
- Aubertot JN, Dore T, Ennaifar S, Ferre F, Fourbet J.F, Schneider O (2005). Integrated Crop Management requires to better take into account cropping systems in epidemiological models. *Proceedings of the 9th International Workshop on Plant Disease Epidemiology*. 11-15 April 2005. Landerneau, France.
- Aubertot, J.N., Guichard, L., Jouy, L., Mischler, P., Omon, B., Petit, M.S., Pleyber, E., Reau, R., Seiler, A., (2011). Guide pratique pour la conception de systèmes de culture plus économes en produits phytosanitaires, 116p. <http://agriculture.gouv.fr/guide-ecophyto-grandes-cultures>. Consulté le 22/11/2013.
- Audsley, E., Milne, A., and Paveley, N. (2005). A foliar disease model for use in wheat disease management decision support systems. *Annals of Applied Biology* 147, 161-172.
- Avelino, J., Zelaya, H., Merlo, A., Pineda, A., Ordonez, M., and Savary, S. (2006). The intensity of a coffee Rust epidemic is dependent on production situations. *Ecological Modelling* 197, 431-447.
- Aylor, D. E. (1999). Biophysical scaling and the passive dispersal of fungus spores: relationship to integrated pest management strategies. *Agricultural and Forest Meteorology* 97, 275-292.
- Azzimonti, G. (2013). Components of quantitative resistance to leaf Rust in wheat cultivars: diversity, variability and specificity. (C. Lannou, Sache, I., and Goyeau, H., ed.). *Plant pathology*.
- Baccar, R., Fournier, C., Dornbusch, T., Andrieu, B., Gouache, D., and Robert, C. (2011). Modelling the effect of wheat canopy architecture as affected by

- sowing density on *Septoria tritici* epidemics using a coupled epidemic-virtual plant model. *Annals of Botany* 108, 1179-1194.
- Bai, G. H., Plattner, R., Desjardins, A., and Kolb, F. (2001). Resistance to *Fusarium* head blight and deoxynivalenol accumulation in wheat. *Plant Breeding* 120, 1-6.
- Bailey, K. L., Gossen, B. D., Lafond, G. P., Watson, P. R., and Derksen, D. A. (2001). Effect of tillage and crop rotation on root and foliar diseases of wheat and pea in Saskatchewan from 1991 to 1998: univariate and multivariate analyses. *Canadian Journal of Plant Science* 81, 789-803.
- Bakan, B. (2008). Approche physiologique de la biosynthèse des trichothécènes par *Fusarium*, Thèse INA-PG, 150 pp.
- Bancal M.O., G. P. (2010). Changement climatique et culture du blé: l'essentiel des impacts. In: "Livre vert du projet Climator. Changement climatique, agriculture et forêt en France: simulations d'impacts sur les principales espèces (2007-2010). pp. chap.C2, 155-168. Brisson N., Levrault F. (coords.),ADEME éditions.
- Banque mondiale, (2008). L'agriculture au service du développement. Washington (D.C)
- Bateman, G. L., Murray, G., Gutteridge, R. J., and Coskun, H. (1998). Effects of method of straw disposal and depth of cultivation on populations of *Fusarium* spp. in soil and on Brown foot rot in continuous winter wheat. *Annals of Applied Biology* 132, 35-47.
- Bell, E. M., Sandler, D. P., and Alavanja, M. C. (2006). High pesticide exposure events among farmers and spouses enrolled in the agricultural health study. *Journal of Agricultural Safety and Health* 12, 101-116.
- Ben Mohamed, L., Rouaissi, M., Sebei, A., Hamza, S., and Harrabi, M. (2000). Effect of genotype, sowing date, nitrogen and potassium fertilisation and fungicides on the development of *Septoria tritici*. Effet du genotype, de la date de semis, de la fertilisation azotée et potassique et des fongicides sur le développement de *Septoria tritici*. *Options Méditerranéennes. Serie A, Séminaires Méditerranéens*, 349-356.
- Benizri, E., and Progetti, F. (1992). A model of simulation of wheat leaf Rust. Mise au point d'un modèle de simulation de la rouille brune du blé. *Agronomie* 12, 97-104.
- Bergez, J. E., Colbach, N., Crespo, O., Garcia, F., Jeuffroy, M. H., Justes, E., Loyce, C., Munier-Jolain, N., and Sadok, W. (2010). Designing crop management systems by simulation. *European Journal of Agronomy* 32, 3-9.
- Birch, A. N. E., Begg, G. S., and Squire, G. R. (2011). How agro-ecological research helps to address food security issues under new IPM and pesticide reduction policies for global crop production systems. *Journal of Experimental Botany* 62, 3251-3261.
- Blackshaw, R. E., Larney, F. J., Lindwall, C. W., Watson, P. R., and Derksen, D. A. (2001). Tillage intensity and crop rotation affect weed community dynamics in a winter wheat cropping system. *Canadian Journal of Plant Science* 81, 805-813.
- Blandino, M., Pilati, A., Reyneri, A., and Scudellari, D. (2010). Effect of Maize Crop Residue Density on *Fusarium* Head Blight and on Deoxynivalenol Contamination of Common Wheat Grains. *Cereal Research Communications* 38, 550-559.

- Blaney, B. J., and Dodman, R. L. (2002). Production of zearalenone, deoxynivalenol, nivalenol, and acetylated derivatives by Australian isolates of *Fusarium graminearum* and *F. pseudograminearum* in relation to source and culturing conditions. *Australian Journal of Agricultural Research* 53, 1317-1326.
- Bockstaller, C., Guichard, L., Makowski, D., Aveline, A., Girardin, P., and Plantureux, S. (2008). Agri-environmental indicators to assess cropping and farming systems. A review. *Agronomy for Sustainable Development* 28, 139-149.
- Bohanec, M. (2003). Decision support, in: Mladenica D., Lavraè N., Bohanec M., Moyle S. (Eds.), *Data mining and decision support: Integration and collaboration*, Kluwer Academic Publishers, pp. 23–35.
- Bohanec, M., Cortet, J., Griffiths, B., Znidarsic, M., Debeljak, M., Caul, S., Thompson, J., and Krogh, P. H. (2007). A qualitative multi-attribute model for assessing the impact of cropping systems on soil quality. *Pedobiologia* 51, 239-250.
- Bohanec, M. (2009). DEXi: program for multi-attribute decision making, Version 3.02. Jozef Stefan Institute, Ljubljana. <http://www-ai.ijs.si/MarkoBohanec/dexi.html>. Consulté le 22/11/2013.
- Bolton, M. D., Kolmer, J. A., and Garvin, D. F. (2008). Wheat leaf Rust caused by *Puccinia triticina*. *Molecular Plant Pathology* 9, 563-575.
- Bottalico, A. (1998). *Fusarium* diseases of cereals: species complex and related mycotoxin profiles, in Europe. *Journal of Plant Pathology* 80, 85-103.
- Breman, H., and de Wit, C. T. (1983). Rangeland Productivity and Exploitation in the Sahel. *Science* 221, 1341-1347.
- Briard L., (2007). Plus d'Agronomie, Moins d'Intrants – Evaluation multicritère de systèmes de culture intégrés testés en Bourgogne, Chambre Régionale d'Agriculture de Bourgogne. Mémoire de fin d'études d'ingénieur ENITA Clermont-Ferrand, 43 p.
- Brisson, N., Mary, B., Ripoche, D., Jeuffroy, M. H., Ruget, F., Nicoulaud, B., Gate, P., Devienne-Barret, F., Antonioletti, R., Durr, C., Richard, G., Beaudoin, N., Recous, S., Tayot, X., Plenet, D., Cellier, P., Mchet, J. M., Meynard, J. M., and Delecolle, R. (1998). STICS: a generic model for the simulation of crops and their water and nitrogen balances. I. Theory and parameterization applied to wheat and corn. *Agronomie* 18, 311-346.
- Broschius, S. C., Frank, J. A., and Frederick, J. R. (1985). Influence of winter wheat management practices on the severity of powdery mildew and *Septoria* blotch in Pennsylvania. *Phytopathology* 75, 538-542.
- Burdon, J. J., and Chilvers, G. A. (1982). Host density as a factor in plant disease ecology. *Annual Review of Phytopathology* 20, 143-166.
- Burleigh (1972). Development of linear equations for predicting wheat leaf rust. Vol. 62, pp. 947-953. *Phytopathology*.
- Caillaud, C. M., Dedryver, C. A., and Simon, J. C. (1994). Development and reproductive potential of the cereal aphid *Sitobion avenae* on resistant wheat lines (*Triticum monococcum*). *Annals of Applied Biology* 125, 219-232.
- Campbell L.C. and Madden L.V. (1990). *Introduction to Plant Disease Epidemiology*, John Wiley & Sons, New York, 532p.
- Capillon (2007). Nouvelles tendances pour l'agriculture mondiale : concilier l'environnement et la productivité. *Sciences* 1, 3-8.
- Carrière A., (2013). Analyse et modélisation des effets du climat, des pratiques culturales et de l'environnement biologique sur la septoriose du blé. Rapport de stage INP-EIPurpan

- Carson, R. (1962). *Silent Spring*. The Riverside Press, Cambridge, Massachusetts, USA, 368p.
- Carter, N., and Rabbinge, R. (1980). Simulation models of the population development of *Sitobion avenae*. *Bulletin SROP* 3, 93-98.
- Caubel, J., Launay, M., Lannou, C., and Brisson, N. (2012). Generic response functions to simulate climate-based processes in models for the development of airborne fungal crop pathogens. *Ecological Modelling* 242, 92-104.
- CEC, (2002). *Towards a Thematic Strategy for Soil Protection*. Communication from the Commission to the Council, the European Parliament, the Economic and Social Committee and the Committee of the Regions.
- Champeil, A., Dore, T., and Fourbet, J. F. (2004a). *Fusarium head blight: epidemiological origin of the effects of cultural practices on head blight attacks and the production of mycotoxins by Fusarium in wheat grains*. *Plant Science* 166, 1389-1415.
- Champeil, A., Fourbet, J. F., Dore, T., and Rossignol, L. (2004b). Influence of cropping system on *Fusarium* head blight and mycotoxin levels in winter wheat. *Crop Protection* 23, 531-537.
- Charles, R., Cholley, E., Frei, P., and Mascher, F. (2011). Crop rotation, soil tillage, variety and fungicide protection in cereal production *Krankheiten beim Winterweizen: Einfluss des Anbausystems und Auswirkungen auf den Ertrag*. *Recherche Agronomique Suisse*, 264-271.
- Chatelin, M. H., Aubry, C., Poussin, J. C., Meynard, J. M., Masse, J., Verjux, N., Gate, P., and Bris, X. I. (2005). *DeciBle*, a software package for wheat crop management simulation. *Agricultural Systems* 83, 77-99.
- Chauvel, B., Tschudy, C., and Munier-Jolain, N. (2011). *Integrated management of the weed flora in low-tillage farming systems* *Gestion integree de la flore adventice dans les systemes de culture sans labour*. *Cahiers Agricultures* 20, 194-203.
- Chelkowski, J., Wisniewska, H., Adamski, T., Golinski, P., Kaczmarek, Z., Kosteki, M., Perkowski, J., and Surma, M. (2000). Effects of *Fusarium culmorum* head blight on mycotoxin accumulation and yield traits in barley doubled haploids. *Journal of Phytopathology-Phytopathologische Zeitschrift* 148, 541-545.
- Chelkowski, J. *Fungal pathogens influencing cereal seed quality at harvest*. Cité par Ruckenbauer et al. (2001), in: J. Chelkowski (Ed.), *Cereal Grain: Mycotoxins, Fungi and Quality in Drying and Storage*. *Developments in Food Science*, vol. 26, Elsevier, Amsterdam, 1991, pp. 53-56.
- Chester K. S., (1944). Low incidence of wheat leaf Rust associated with late winter weather or antagonism of *Septoria tritici*. *Plant Disease*, 28: 280-287
- Chester, K. S. (1946). *The Nature and Prevention of Cereal Rusts as Exemplified in the Leaf Rust of Wheat*. 2nd ed. *Chronica Botanica*, Waltham, MA.
- Chevalier-Gerard, C., Denis, J. B., and Meynard, J. M. (1994). Estimation of yield loss caused by fungal diseases on winter wheat: construction and validation of a model taking into account the effects of the cropping system *Perte de rendement due aux maladies cryptogamiques sur ble tendre d'hiver. Construction et validation d'un modele de l'effet du systeme de culture*. *Agronomie* 14, 305-318.
- Chicouène, D. (2010). *Main types of weed noxiousness in major temperate crops*. 21ème Conférence du COLUMA. *Journées Internationales sur la Lutte contre les Mauvaises Herbes*, Dijon, France, 8-9 décembre, 2010. pp. 120-129

- Cholez C. (2011). Approche systémique pour appréhender les communautés de bioagresseurs du blé d'hiver. Recueil de données en vue de l'évaluation d'IPSIM-Wheat, modèle de simulation des profils de dégâts de bioagresseurs du blé. Mémoire d'Ingénieur INP Toulouse-EIPurpan. Prix de la fondation Xavier Bernard de l'Académie d'agriculture de France.
- Colbach, N., and Chauvel, B. (2005). AlomySys: a model of the effect of cropping systems on weed demography. Example of blackgrass (*Alopecurus myosuroides* Huds.). Proceedings of the 13th EWRS Symposium, Bari, Italy, 19-23 June 2005, unpaginated.
- Colbach, N., and Huet, P. (1995). Modelling the frequency and severity of root and foot diseases in winter wheat monocultures. *European Journal of Agronomy* 4, 217-227.
- Colbach, N., Meynard, J. M., Duby, C., and Huet, P. (1999). A dynamic model of the influence of rotation and crop management on the disease development of eyespot. Proposal of cropping systems with low disease risk. *Crop Protection* 18, 451-461.
- Coquil, X., Blouet, A., Fiorelli, J. L., Bazard, C., and Trommenschlager, J. M. (2009). Designing organic dairy systems based on agronomic principles
Conception de systemes laitiers en agriculture biologique: une entree agronomique. *INRA Productions Animales* 22, 221-234.
- Cornish, P. S., Baker, G. R., and Murray, G. M. (1990). Physiological responses of wheat (*Triticum aestivum*) to infection with *Mycosphaerella graminicola* causing *Septoria tritici* blotch. *Australian Journal of Agricultural Research* 41, 317-327.
- Cortet, J., Bohanec, M., Griffiths, B., Znidarsic, M., Debeljak, M., Caul, S., Thompson, J., and Krogh, P. H. (2009). Biodiversity and soil quality in agroecosystems: the use of a qualitative multi-attribute model. *IOBC/WPRS Bulletin* 42, 37-40.
- Cosic, J., Vrandecic, K., Novoselovic, D., Drezner, G., and Jurkovic, D. (2006). Influence of planting density and planting date on the occurrence of *Fusarium* root rot on winter wheat - A phytosanitary food chain problem. *Cereal Research Communications* 34, 769-772.
- Cousens, R. (1985). A simple model relating yield loss to weed density. *Annals of Applied Biology* 107, 239-252.
- Cox, C. M., Garrett, K. A., Bowden, R. L., Fritz, A. K., Dendy, S. P., and Heer, W. F. (2004). Cultivar mixtures for the simultaneous management of multiple diseases: Tan spot and leaf Rust of wheat. *Phytopathology* 94, 961-969.
- Daamen, R. A. (1991). An advisory model for control of *Puccinia recondita* in winter wheat. *Netherlands Journal of Plant Pathology* 97, 275-288.
- Daamen, R. A., Wijnands, F. G., and Vliet, G. v. d. (1989). Epidemics of diseases and pests of winter wheat at different levels of agrochemical input. A study on the possibilities for designing an integrated cropping system. *Journal of Phytopathology* 125, 305-319.
- Dedryver, C. A., and Tanguy, S. (1984). Biology of cereal aphids in western France. V. - Effect of sowing date of winter wheat on infestation of fields by *Rhopalosiphum padi* (L.), *Sitobion avenae* (F.) and *Metopolophium dirhodum* (Wlk.) and on their population development in spring
Biologie des pucerons des cereales dans l'ouest de la France. V. - Influence de la date de semis du blé d'hiver sur les modalités d'infestation des parcelles par *Rhopalosiphum padi* (L.), *Sitobion avenae* (F.) et *Metopolophium*

- dirhodum* (Wlk.) et sur le développement de leurs populations au printemps. *Agronomie* 4, 711-719.
- Dedryver, C. A., Gallic, J. F. I., Haack, L., Halkett, F., Outreman, Y., and Simon, J. C. (2008). Seasonal and annual genotypic variation and the effect of climate on population genetic structure of the cereal aphid *Sitobion avenae* in northern France. *Bulletin of Entomological Research* 98, 159-168.
- Dedryver, C. A., Parisey, N., Turpeau-Ait Ighil, E., and Hulle, M. (2011). Climate and aphid flight: what we get from 30 years of grain aphid *S. avenae* catches by the French suction trap network Agraphid
Climat et vols de pucerons: ce que nous apprennent 30 ans de captures du puceron des épis *Sitobion avenae* par le réseau de pièges à aspiration Agraphid. *Les Cochenilles: ravageur principal ou secondaire*. 9eme Conference Internationale sur les Ravageurs en Agriculture, SupAgro, Montpellier, France, 25-27 octobre 2011, 550-558.
- Deguine, J.P., Ferron, P., Russell, D. (2008). Protection des cultures : de l'agrochimie à l'agroécologie. Ed.Quæ. 190 p.
- Délos, M. (1995). Top: a model forecasting eyespot development. Top: modele de prevision de l'evolution du pietin-verse. *Phytoma*, 26-28.
- Délos, M. et al, (2008). Mémento d'assistance technique pour la mise en œuvre de bonnes pratiques agronomiques, volet santé des végétaux. Document de travail interne, différentes versions, 383 pages.
- Délos, M., (2011). Stratégies de protection des cultures et critères de mise en oeuvre. Communication de données personnelles.
- Derksen, D. A., Lafond, G. P., Thomas, A. G., Loeppky, H. A., and Swanton, C. J. (1993). Impact of agronomic practices on weed communities: tillage systems. *Weed Science* 41, 409-417.
- Dew, D.A. (1972). An index of competition for estimating crop loss due to Weeds. *Canadian Journal of Plant Science* 52, 921-927
- Deytieux, V., Nemecek, T., Knuchel, R. F., Gaillard, G., and Munier-Jolain, N. M. (2012). Is Integrated Weed Management efficient for reducing environmental impacts of cropping systems? A case study based on life cycle assessment. *European Journal of Agronomy* 36, 55-65.
- Dill-Macky, R., and Jones, R. K. (2000). The effect of previous crop residues and tillage on *Fusarium* head blight of wheat. *Plant Disease* 84, 71-76.
- Dongmo, A. L., and Munier-Jolain, N. (2011). Assessment of cropping systems with low herbicide inputs: technical feasibility and economic profitability at the farm level.
Evaluation des systemes de culture economes en herbicides: faisabilite technique et rentabilite economique au niveau de l'exploitation agricole. *Cahiers Agricultures* 20, 468-479.
- Doohan, F. M., Brennan, J., and Cooke, B. M. (2003). Influence of climatic factors on *Fusarium* species pathogenic to cereals. *European Journal of Plant Pathology* 109, 755-768.
- Doré T. et Rechauchère O., (2010). La question agricole mondiale. Enjeux économiques, sociaux et environnementaux. La documentation française. Paris. 173p.
- Duffield, S. J., Bryson, R. J., Young, J. E. B., Sylvester-Bradley, R., and Scott, R. K. (1997). The influence of nitrogen fertiliser on the population development of the cereal aphids *Sitobion avenae* (F.) and *Metopolophium dirhodum* (Wlk.) on field grown winter wheat. *Annals of Applied Biology* 130, 13-26.

- Durr, C., Aubertot, J. N., Richard, G., Dubrulle, P., Duval, Y., and Boiffin, J. (2001). SIMPLE: a model for SIMulation of PLant Emergence predicting the effects of soil tillage and sowing operations. *Soil Science Society of America Journal* 65, 414-423.
- EFSA, (2006). <http://www.efsa.europa.eu/fr/topics/topic/mycotoxins.htm>. consulté le 22/11/2013.
- Ehler, L. E. (2006). Integrated pest management (IPM): definition, historical development and implementation, and the other IPM. *Pest Management Science* 62, 787-789.
- El-Jarroudi, M., Delfosse, P., Maraite, H., Hoffmann, L., and Tychon, B. (2009). Assessing the accuracy of simulation model for septoria leaf blotch disease progress on winter wheat. *Plant Disease* 93, 983-992.
- El-Jarroudi M., G. F., Tychon B., Hoffman L., Delfosse P. (2010). Rouille brune du blé, un modèle pour évaluer les risques. L'évaluation des paramètres météorologiques affectant la rouille brune du blé au Grand-Duché de Luxembourg à l'origine d'un outil de prévision., Vol. 637, pp. 9-12. *Phytoma*.
- Eudes, F., (1998). Thèse - Etude de l'impact des trichothécènes de *Fusarium* chez le blé et sélection in vitro pour la résistance à la fusariose de l'épi, Université de Laval Québec, 1-83p.
- Erven, T., Racca, P., and Kleinhenz, B. (2010). *Septoria tritici* on winter wheat - use of a weather-based forecasting model SEPTRI1. *Septoria tritici an Winterweizen - Das witterungsbasierte sortenabhängige Prognosemodell SEPTTRI1. Julius-Kuhn-Archiv*, 258-259.
- Eversmeyer (1970). A Method of Predicting Epidemic development of wheat Leaf Rust. *Phytopathology* 60, 805-811.
- Eversmeyer, M. G., and Kramer, C. L. (1994). Survival of *Puccinia recondita* and *P. graminis* urediniospores as affected by exposure to weather conditions at one meter. *Phytopathology* 84, 332-335.
- Eversmeyer, M. G., and Kramer, C. L. (1996). Modeling winter and early spring survival of *Puccinia recondita* in wheat nurseries during 1890 to 1993. *Plant Disease* 80, 490-493.
- Eversmeyer, M. G., and Kramer, C. L. (1998). Models of early spring survival of wheat leaf Rust in the Central Great Plains. *Plant Disease* 82, 987-991.
- Eversmeyer, M. G., and Kramer, C. L. (2000). Epidemiology of wheat leaf and stem Rust in the central Great Plains of the USA. *Annual Review of Phytopathology* 38, 491-513.
- Eyal, Z. (1981). Integrated control of *Septoria* diseases of wheat. *Plant Disease* 65, 763-768.
- Eyal, Z. (1999). The *Septoria tritici* and *Stagonospora nodorum* blotch diseases of wheat. *European Journal of Plant Pathology* 105, 629-641.
- Fabre, F., Dedryver, C. A., Leterrier, J. L., and Plantegenest, M. (2003). Aphid abundance on cereals in autumn predicts yield losses caused by Barley yellow dwarf virus. *Phytopathology* 93, 1217-1222.
- Fabre, F., Plantegenest, M., Mieuze, L., Dedryver, C. A., Leterrier, J. L., and Jacquot, E. (2005). Effects of climate and land use on the occurrence of viruliferous aphids and the epidemiology of barley yellow dwarf disease. *Agriculture, Ecosystems & Environment* 106, 49-55.
- Fabre, F., Plantegenest, M., and Yuen, J. (2007). Financial benefit of using crop protection decision rules over systematic spraying strategies. *Phytopathology* 97, 1484-1490.

- FAO (2003). World agriculture towards 2015-2030. An FAO perspective. Rome. <http://www.fao.org/docrep/005/y4252e/y4252e00.htm>]. Consulté le 22/11/2013.
- FAO, 2012.) L'état de l'insécurité alimentaire dans le monde. <http://www.fao.org/docrep/017/i3027f/i3027f00.htm>. Consulté le 22/11/2013.
- FAO, (1968). Report of the first session of the FAO panel of experts on integrated pest control. September 18-22 1967. FAO-UN, Rome. Meet Rep PL/19671M/7, 19 p.
- FAO, 2009. Comment nourrir le monde en 2050. <http://www.fao.org/wsfs/forum2050/wsfs-forum/fr/>. Consulté le 22/11/2013.
- Fauzi, M. T., and Paulitz, T. C. (1994). The effect of plant-growth regulators and nitrogen on fusarium head blight of the spring wheat cultivar max. *Plant Disease* 78, 289-292.
- Fernandez, M. R., Huber, D., Basnyat, P., and Zentner, R. P. (2008). Impact of agronomic practices on populations of Fusarium and other fungi in cereal and noncereal crop residues on the Canadian Prairies. *Soil & Tillage Research* 100, 60-71.
- Ferron P. (1999). Protection intégrée des cultures : évolution du concept et de son application. *Dossiers de l'Environnement de l'INRA* 19, 19-28.
- Ferron, P., and Deguine, J. P. (2005). Crop protection, biological control, habitat management and integrated farming. A review. *Agronomy for Sustainable Development* 25, 17-24.
- Foulkes, M. J., Paveley, N. D., Worland, A., Welham, S. J., Thomas, J., and Snape, J. W. (2006). Major genetic changes in wheat with potential to affect disease tolerance. *Phytopathology* 96, 680-688.
- Fourbet, J.F., Malmauret, L., Doré, T., Verger, P.(2001). Impact du mode de conduite des cultures sur la qualité agronomique et toxicologique du blé. Application à l'agriculture biologique, Report no. 99-36, Convention MAP/INRA, 2001.
- FRAC, 2011. http://www.frac.info/work/FRAC%20SBI%20WG%202011%20protocol%20final_RG.pdf. Consulté le 17/12/2013.
- Fragoulis, G., Trevisan, M., Guardo, A. d., Sorce, A., Meer, M. v. d., Weibel, F., and Capri, E. (2009). Development of a management tool to indicate the environmental impact of organic viticulture. *Journal of Environmental Quality* 38, 826-835.
- Franceagrimer,(2013).<http://www.franceagrimer.fr/content/download/23517/194926/file/12+-+Brochure+---Etude+sur+le+march%C3%A9+du+bl%C3%A9+dur.pdf>. Consulté le 22/11/2013.
- Fried, G. (2007). Variations spatiales et temporelles des communautés adventices des cultures annuelles en France. Thèse de l'Université de bourgogne. Institut national de la recherche agronomique.
- Fried, G., Norton, L. R., and Reboud, X. (2008). Environmental and management factors determining weed species composition and diversity in France. *Agriculture, Ecosystems & Environment* 128, 68-76.
- Galtier, P., Comera, C., Oswald, I., Puel, O. (2000). Mycotoxines: origins et toxicités, in: AFPP—6ème conférence internationale sur les maladies des plantes, vol. 1, Tours, France, pp. 77–86.
- Gardarin, A., Durr, C., and Colbach, N. (2007a). "Analysis of the relationships between emergence processes and life history traits of weed species of North-Western Europe." 14th EWRS Symposium, Hammar, Norway.

- Gardarin, A., Munier-Jolain, N., and Colbach, N. (2007b). FlorSys: a model of the effects of cropping systems on weed demography
FlorSys: un modele des effets des systemes de culture sur la demographie des adventices. 20eme Conference du COLUMA. Journees Internationales sur la Lutte contre les Mauvaises Herbes, Dijon, France, 11-12 decembre, 2007, 289-298.
- Gate, P. (1995). Ecophysiologie du blé. De la plante à la culture. In: Techniques & Documentation Lavoisier, 430p, Paris.
- German, S., Chaves, M., Campos, P., Viedma, L. d., and Madariaga, R. (2009). Are Rust pathogens under control in the Southern Cone of South America?. Technical Workshop, Borlaug Global Rust Initiative, Cd. Obregon, Sonora, Mexico, 17-20 March, 2009, 65-73.
- Ghaffary, S. M. T., Robert, O., Laurent, V., Lonnet, P., Margale, E., Lee, T. A. J. v. d., Visser, R. G. F., and Kema, G. H. J. (2011). Genetic analysis of resistance to septoria tritici blotch in the French winter wheat cultivars Balance and Apache. TAG Theoretical and Applied Genetics 123, 741-754.
- Gigot, C., Cheyron, P. d., Durand, B., Gerard, L., Huber, L., Kerhornou, B., Leconte, M., Maumene, C., Saint-Jean, S., and Vallavieille-Pope, C. d. (2011). Use of varietal associations to reduce the severity of septoria in wheat
Recours aux associations varietales pour diminuer la severite de la septoriose du ble. 4eme Conference Internationale sur les Methodes Alternatives en Protection des Cultures. Evolution des cadres reglementaires europeen et francais. Nouveaux moyens et strategies Innovantes, Nouveau Siecle, Lille, France, 8-10 mars 2011, 175-182.
- Gigot, C., Saint-Jean, S., Huber, L., Leconte, M., Gerard, L., and Vallavieille-Pope, C. d. (2009). Progression of wheat septoria in different types of culture under the action of rain
Progression de la septoriose du ble au sein de differents types de cultures sous l'action de la pluie. Association Francaise de Protection des Plantes, 9eme conference international sur les maladies des plantes, Tours, France, 8 et 9 Decembre 2009, 362-368.
- Gladders, P., Paveley, N. D., Barrie, I. A., Hardwick, N. V., Hims, M. J., Langton, S., and Taylor, M. C. (2001). Agronomic and meteorological factors affecting the severity of leaf blotch caused by *Mycosphaerella graminicola* in commercial wheat crops in England. Annals of Applied Biology 138, 301-311.
- Gliessman, S.R. (2004). Integrating agroecological processes into cropping systems research. pp 61-80. In D. Clements & A. Shrestha (eds.) New dimensions in agroecology. Food Products Press, New York, NY.
- Gosselke, U., Triltsch, H., Rossberg, D., and Freier, B. (2001). GETLAUS01 - the latest version of a model for simulating aphid population dynamics in dependence on antagonists in wheat. Ecological Modelling 145, 143-157.
- Gouache, D., Couleaud, G. (2009). "Timing of fungicide treatments against Septoria: stakes and potential of the "SeptoLIS" model. Le positionnement des traitements fongicides: enjeu pour la septoriose et interet du modele "SeptoLIS"." AFPP, 9ème Conférence internationale sur les maladies des plantes. Tours, 8 et 9 Décembre 2009 pp. 455-463.
- Gouache, D., Gate, P., Robert, C., Fournier, C. (2009). "Sowing date, disease pressure and yield potential: from understanding to recommendation. Date de semis, pression de septoriose et potentiel de rendement: de la comprehension

- a la preconisation operationnelle." AFPP, 9ème conférence international sur les maladies des plantes, Tours, France, 8 et 9 Décembre 2009 pp. 263-271
- Gouache, D., Hourcade, D., Lebrun, M. H., Marcel, T., Ducasse, A., Deller, S., Audeon, C., Goyeau, H., Suffert, F., Michelet, C., Robert, O., Cadot, V., Ghaffary, S. M. T., and Kema, G. H. J. (2012). Creation of tools for the improved evaluation of wheat cultivar resistance to *Septoria tritici* Mise au point d'outils ameliores pour l'evaluation des resistances varietales du ble tendre a *Septoria tritici*. 10e Conference Internationale sur les Maladies des Plantes, Tours, France, 3, 4 & 5 Decembre, 2012, 125-139.
- Goyeau, H., Berder, J., Czerepak, C., Gautier, A., Lanen, C., and Lannou, C. (2012). Low diversity and fast evolution in the population of *Puccinia triticina* causing durum wheat leaf Rust in France from 1999 to 2009, as revealed by an adapted differential set. *Plant Pathology* 61, 761-772.
- Goyeau, H., and Lannou, C. (2011). Specific resistance to leaf Rust expressed at the seedling stage in cultivars grown in France from 1983 to 2007. *Euphytica* 178, 45-62.
- Goyeau, H., Lannou, C., Pariaud, B., Azzimonti, G., Cheyron, P. d., Couleaud, G., and Maumene, C. (2009). Durability and management of genetic resistance to wheat leaf Rust. Durabilite et gestion de la resistance genetique du ble a la rouille brune causee par *Puccinia triticina*. Association Francaise de Protection des Plantes, 9eme conference international sur les maladies des plantes, Tours, France, 8 et 9 Decembre 2009, 235-244.
- Goyeau, H., Park, R., Schaeffer, B., and Lannou, C. (2006). Distribution of pathotypes with regard to host cultivars in French wheat leaf Rust populations. *Phytopathology* 96, 264-273.
- Griffiths, B. S., Ball, B. C., Daniell, T. J., Hallett, P. D., Neilson, R., Wheatley, R. E., Osler, G., and Bohanec, M. (2010). Integrating soil quality changes to arable agricultural systems following organic matter addition, or adoption of a ley-arable rotation. *Applied Soil Ecology* 46, 43-53.
- Hassan, Z. M., Kramer, C. L., and Eversmeyer, M. G. (1986). Summer and winter survival of *Puccinia recondita* and infection by soilborne urediniospores. *Transactions of the British Mycological Society* 86, 365-372.
- Hill, S. B., MacRae, R. J., (1995). Conceptual frameworks for the transition from conventional to sustainable agriculture. *Journal of Sustainable Agriculture*, 7 (1), 81-87.
- Holland, J. M. (1997). Impact of integrated farming husbandry practices on cereal pests and yield. *Aspects of Applied Biology*, 305-311.
- Homdork, S., Fehrmann, H., and Beck, R. (2000). Effects of field application of tebuconazole on yield, yield components and the mycotoxin content of *Fusarium*-infected wheat grain. *Journal of Phytopathology-Phytopathologische Zeitschrift* 148, 1-6.
- Honek, A. (1987). Effect of plant quality and microclimate on population growth and maximum abundances of cereal aphids, *Metopolophium dirhodum* (Walker) and *Sitobion avenae* (F.) (Hom., Aphididae). *Journal of Applied Entomology* 104, 304-313.
- Hooker, D. C., Schaafsma, A. W., and Tamburic-Ilincic, L. (2002). Using weather variables pre- and post-heading to predict deoxynivalenol content in winter wheat. *Plant Disease* 86, 611-619.

- Huerta-Espino, J., Singh, R. P., German, S., McCallum, B. D., Park, R. F., Chen, W. Q., Bhardwaj, S. C., and Goyeau, H. (2011). Global status of wheat leaf Rust caused by *Puccinia triticina*. *Euphytica* 179, 143-160.
- Hulle, M., Turpeau, E., Dedryver, C.A. (2011). Les pucerons des grandes cultures : Cycles biologiques et activités de vol. Éditions Quae 136p.
- IARC,(2012). Monographs on the Evaluation of Carcinogenic Risks to Humans. Some Naturally Occurring Substances: Food Items and Constituents, Heterocyclic Aromatic Amines and Mycotoxins (IARC, ed.), Lyon, Vol. 56. 599p.
- Infloweb, 2012. <http://www.infloweb.fr/>. Consulté le 22/11/2013
- INRA-CIRAD, 2009. Agrimonde. Agricultures et alimentations du monde en 2050 : scénarios et défis pour un développement durable. Note de synthèse. <http://www6.paris.inra.fr/depe/Projets/Agrimonde>. Consulté le 22/11/2013.
- INRA, 2008. HYP3. Hypermedia en protection des plantes (section pathologie). <http://www7.inra.fr/hyp3/>. Consulté le 22/11/2013.
- INRA, 1998. HYPPZ. Encyclopédie des ravageurs européens. Consulté le 26/09/2013.Consulté le 22/11/2013.
- INRA, 2009. Ecophyto,R&D. Vers des systèmes de culture économes en pesticides. VOLET 1. TOME II : Analyse comparative de différents systèmes en grandes cultures. Janvier 2009.
- INRA, (2010). Web Badoma. <http://www2.dijon.inra.fr/bga/badoma/presentation/> Consulté le 22/11/2013
- INSERM, (2013). Pesticides – Effets sur la santé. Editions Inserm, Collection Expertise collective, 1014 pages. <http://presse-inserm.fr/pesticides-effets-sur-la-sante-une-expertise-collective-de-linserm/8463/> .Consulté les 13/11/2013.
- InVivo AgroSolutions, (2013). Technical response.
- ITAB, (2012). Connaître les adventices pour les maîtriser en grandes cultures sans herbicide. http://www.itab.asso.fr/downloads/desherb-meca/dm-brochure-adventices_1_guide-lecture.pdf. Consulté le 22/11/2013
- Iserning, R. (2010). Pesticides reduce biodiversity. *Pesticides News*, 4-7.
- Jackson, L. F., and Wennig, R. W. (1997). Use of wheat cultivar blends to improve grain yield and quality and reduce disease and lodging. *Field Crops Research* 52.
- Jamieson, P. D., Semenov, M. A., Brooking, I. R., and Francis, G. S. (1998). Sirius: a mechanistic model of wheat response to environmental variation. *European Journal of Agronomy* 8, 161-179.
- Jeger, M. J. (2000). Bottlenecks in IPM. *Crop Protection* 19, 787-792.
- Jenkyn, J. F., Christian, D. G., Bacon, E. T. G., Gutteridge, R. J., and Todd, A. D. (2001). Effects of incorporating different amounts of straw on growth, diseases and yield of consecutive crops of winter wheat grown on contrasting soil types. *Journal of Agricultural Science* 136, 1-14.
- Johnson, K.B. (1990). Assessing multiple pest populations and their effects on crop yield. *Crop Loss Assessment in Rice*IRRI, Los Baños, Philippines. pp. 203–213
- Jordan, V.W.L., Hutcheon, J.A., (1999). Disease management in less intensive, integrated wheat systems. In: Lucas JA, Bowyer P, AndersonMH, eds. *Septoria on Cereals: A Study of Pathosystems*. Cambridge, UK: CABI Publishing, 263–72.

- Kaloumenos, N. S., Adamouli, V. N., Dordas, C. A., and Eleftherohorinos, I. G. (2011). Corn poppy (*Papaver rhoeas*) cross-resistance to ALS-inhibiting herbicides. *Pest Management Science* 67, 574-585.
- King, J. E. (1977). Surveys of diseases of winter wheat in England and Wales, 1970-75. *Plant Pathology* 26, 8-20.
- Kogan, M. (1998). Integrated pest management: historical perspectives and contemporary developments. *Annual Review of Entomology* 43, 243-270.
- Kolmer, J. A. (1996). Genetics of resistance to wheat leaf Rust. *Annual Review of Phytopathology* 34, 435-455.
- Kolmer, J. A. (2005). Tracking wheat Rust on a continental scale. *Current Opinion in Plant Biology* 8, 441-449.
- Krebs, H., Dubois, D., Kulling, C., and Forrer, H. R. (2000). Effects of preceding crop and tillage on the incidence of *Fusarium* spp. and mycotoxin deoxynivalenol content in winter wheat grain
Effets du travail du sol et du precedent cultural sur la contamination du grain de ble par les *Fusarium* et la mycotoxine deoxynivalenol. *Agrarforschung* 7, 264-268.
- Kropff, M. J., Teng, P. S., and Rabbinge, R. (1995). The challenge of linking pest and crop models. *Agricultural Systems* 49, 413-434.
- Lamine, C. (2011). Transition pathways towards a robust ecologization of agriculture and the need for system redesign. Cases from organic farming and IPM. *Journal of Rural Studies* 27, 209-219.
- Lancashire, P. D., Bleiholder, H., Boom, T. v. d., Langeluddeke, P., Stauss, R., Weber, E., and Witzemberger, A. (1991). A uniform decimal code for growth stages of crops and Weeds. *Annals of Applied Biology* 119, 561-601.
- Landschoot, S., Waegeman, W., Audenaert, K., Damme, P. v., Vandepitte, J., Baets, B. d., and Haesaert, G. (2013a). A field-specific web tool for the prediction of *Fusarium* head blight and deoxynivalenol content in Belgium. *Computers and Electronics in Agriculture* 93, 140-148.
- Landschoot, S., Waegeman, W., Audenaert, K., Haesaert, G., and Baets, B. d. (2013b). Ordinal regression models for predicting deoxynivalenol in winter wheat. *Plant Pathology* 62, 1319-1329.
- Langseth, W., Hoie, R., and Gullord, M. (1995). The influence of cultivars, location and climate on deoxynivalenol contamination in Norwegian oats 1985-1990. *Acta Agricultura Scandinavica. Section B, Soil and Plant Science* 45, 63-67.
- Lannou, C., Vallavieille-Pope, C. d., Biass, C., and Goyeau, H. (1994a). The efficacy of mixtures of susceptible and resistant hosts to two wheat Rusts of different lesion size: controlled condition experiments and computerized simulations. *Journal of Phytopathology* 140, 227-237.
- Lannou, C., Vallavieille-Pope, C. d., and Goyeau, H. (1994b). Host mixture efficacy in disease control: effects of lesion growth analyzed through computer-simulated epidemics. *Plant Pathology* 43, 651-662.
- Larsson H., (2004). A crop loss model and economic thresholds for the grain aphid, *S.avenae*, in winter in southern Sweden. Department of Crop Sciences, Swedish University of Agricultural Sciences Sweden. Science Direct Crop protection (24) 397-405p
- Lavorel, S., and Garnier, E. (2002). Predicting changes in community composition and ecosystem functioning from plant traits: revisiting the Holy Grail. *Functional Ecology* 16, 545-556.

- Leitch, M. H., and Jenkins, P. D. (1995). Influence of nitrogen on the development of *Septoria* epidemics in winter wheat. *Journal of Agricultural Science* 124, 361-368.
- Leplat, J., Friberg, H., Abid, M., and Steinberg, C. (2013). Survival of *Fusarium graminearum*, the causal agent of Fusarium head blight. A review. *Agronomy for Sustainable Development* 33, 97-111.
- Lepoivre P., (2003). *Phytopathologie*. Editions De Boeck, Presses agronomiques de Gembloux, Bruxelles, 427p.
- Licker, R., Kucharik, C. J., Dore, T., Lindeman, M. J., and Makowski, D. (2013). Climatic impacts on winter wheat yields in Picardy, France and Rostov, Russia: 1973-2010. *Agricultural and Forest Meteorology* 176, 25-37.
- Lori, G. A., Sisterna, M. N., Sarandon, S. J., Rizzo, I., and Chidichimo, H. (2009). Fusarium head blight in wheat: Impact of tillage and other agronomic practices under natural infection. *Crop Protection* 28, 495-502.
- Lovell, D. J., Parker, S. R., Hunter, T., Royle, D. J., and Coker, R. R. (1997). Influence of crop growth and structure on the risk of epidemics by *Mycosphaerella graminicola* (*Septoria tritici*) in winter wheat. *Plant Pathology* 46, 126-138.
- Lovell, D. J., Parker, S. R., Hunter, T., Welham, S. J., and Nichols, A. R. (2004). Position of inoculum in the canopy affects the risk of *septoria tritici* blotch epidemics in winter wheat. *Plant Pathology* 53, 11-21.
- Lovell, D. J., Parker, S. R., Paveley, N. D., and Worland, A. J. (2002). Understanding field resistance mechanisms for improved control of *Septoria tritici*. *Plant Protection Science* 38, 165-169.
- Loyce, C., Meynard, J. M., Bouchard, C., Rolland, B., Lonnet, P., Bataillon, P., Bernicot, M. H., Bonnefoy, M., Charrier, X., Debote, B., Demarquet, T., Duperrier, B., Felix, I., Heddadj, D., Leblanc, O., Leleu, M., Mangin, P., Meausoone, M., and Doussinault, G. (2008). Interaction between cultivar and crop management effects on winter wheat diseases, lodging, and yield. *Crop Protection* 27, 1131-1142.
- Loyce, C., Meynard, J. M., Bouchard, C., Rolland, B., Lonnet, P., Bataillon, P., Bernicot, M. H., Bonnefoy, M., Charrier, X., Debote, B., Demarquet, T., Duperrier, B., Félix, I., Heddadj, D., Leblanc, O., Leleu, M., Mangin, P., Méausoone, M., and Doussinault, G. (2012). Growing winter wheat cultivars under different management intensities in France: A multicriteria assessment based on economic, energetic and environmental indicators. *Field Crops Research* 125, 167-178.
- Lucas, P., Meynard, J.M., (2000). La protection intégrée des cultures à l'INRA, Rapport à la direction scientifique EFA, 28 p.
- Lucas, P., (2007). Le concept de la protection intégrée des cultures. *Innovations Agronomiques*, 1, 15-21
- MAAF, 2002. Référentiel de l'agriculture raisonnée. CSO du 80/01/2002. 26p. <http://www.farre.org/fileadmin/medias/pdf/referentielAR2007.pdf>. Consulté le 22/11/2013.
- MAAF, 2008. Ecophyto 2018. <http://agriculture.gouv.fr/ecophyto>. Consulté le 22/11/2013.
- MAAF, 2013. <http://agriculture.gouv.fr/les-produits-phytosanitaires>
- Magan, N., Hope, R., Colleate, A., and Baxter, E. S. (2002). Relationship between growth and mycotoxin production by *Fusarium* species, biocides and environment. *European Journal of Plant Pathology* 108, 685-690.

- McCallum, B. D., Fetch, T., and Chong, J. (2007). Cereal Rust control in Canada. *Australian Journal of Agricultural Research* 58, 639-647.
- McIntosh, R.A., 2013. Catalogue of gene symbols for wheat (2012). Available at <http://www.shigen.nig.ac.jp/wheat/komugi/genes/download.jsp>. Consulté le 20/10/2013.
- McRoberts, N., Hughes, G., and Savary, S. (2003). Integrated approaches to understanding and control of diseases and pests in field crops. *Australasian Plant Pathology* 32, 167-180.
- Magnard A. (2012). Analyse et modélisation des effets des pratiques culturales et de la situation de production sur la rouille brune du blé. Mémoire d'Ingénieur INP Toulouse-ENSAT.
- Mahmood, T., Marshall, D., and McDaniel, M. E. (1991). Effect of winter cultivar mixtures on leaf Rust severity and grain yield. *Phytopathology* 81, 470-474.
- Marti J., (2013). Mise en place d'une approche systémique de protection intégrée afin d'appréhender les communautés d'adventices du blé. Mémoire de stage de s8 dominante giap de Bordeaux Sciences Agro.
- Mascagni, H. J., Jr., Harrison, S. A., Russin, J. S., Desta, H. M., Colyer, P. D., Habetz, R. J., Hallmark, W. B., Moore, S. H., Rabb, J. L., Hutchinson, R. L., and Boquet, D. J. (1997). Nitrogen and fungicide effects on winter wheat produced in the Louisiana Gulf Coast region. *Journal of Plant Nutrition* 20, 1375-1390.
- Meynard, J.M., Rolland, B., Loyce, C., Félix, I., Lonnet, P. (2009). Quelles combinaisons variété/conduite pour améliorer les performances économiques et environnementales de la culture du blé tendre? *Innov. Agron.*, 7 (2009), pp. 29–47 http://www.inra.fr/ciag/revue_innovations_agronomiques/volume_7. Consulté le 22/11/2013.
- Mischler, P., Lheureux, S., Dumoulin, F., Menu, P., Sene, O., Hopquin, J.P., Cariolle, M., Reau, R., Munier-Jolain, N., Faloya, V., Boizard, H., Meynard, J.M. (2009). Huit fermes de grande culture engagées en production intégrée réduisent les pesticides sans baisse de marge. *Cour. Environ. INRA*, 57 pp. 73–91 <http://www.inra.fr/dpenv/pdf/MischlerC57.pdf>. Consulté le 22/11/2013.
- Mille, B., Fraj, M. B., Monod, H., and Vallavieille-Pope, C. d. (2006). Assessing four-way mixtures of winter wheat cultivars from the performances of their two-way and individual components. *European Journal of Plant Pathology* 114, 163-173.
- Mille, B., and Vallavieille-Pope, C. d. (2001). Cultivar mixtures and fungicide sprays against leaf and glume blotch and Brown Rust in winter wheat Associations varietales et interventions fongicides contre les septorioses et la rouille brune du ble d'hiver. *Cahiers Agricultures* 10, 125-129.
- Mishra, A. N., Varma, P. K., and Ruwali, K. N. (1994). Rust incidence in late-sown wheat (*Triticum aestivum*). *Indian Journal of Agricultural Sciences* 64, 266-267.
- Moschini, R. C., and Perez, B. A. (1999). Predicting wheat leaf Rust severity using planting date, genetic resistance, and weather variables. *Plant Disease* 83, 381-384.
- Moreau, J. M., and Maraite, H. (1999). Integration of knowledge on wheat phenology and *Septoria tritici* epidemiology into a disease risk simulation model validated in Belgium. *Aspects of Applied Biology*, 1-6.
- Mueller, M. E. H., Brenning, A., Verch, G., Koszinski, S., and Sommer, M. (2010). Multifactorial spatial analysis of mycotoxin contamination of winter wheat at

- the field and landscape scale. *Agriculture Ecosystems & Environment* 139, 245-254.
- Mundt, C. C., Brophy, L. S., and Schmitt, M. S. (1995). Choosing crop cultivars and cultivar mixtures under low versus high disease pressure: a case study with wheat. *Crop Protection* 14, 509-515.
- Nash, J. E., and Sutcliffe, J. V. (1970). River flow forecasting through conceptual models part I — A discussion of principles. *Journal of Hydrology* 10, 282-290.
- Niehoff, B., and Poehling, H. M. (1995). Population dynamics of aphids and syrphid larvae in winter wheat treated with different rates of pirimicarb. *Agriculture, Ecosystems & Environment* 52, 51-55.
- Nolot, J. M., and Debaeke, P. (2003). Principles and tools for the design, management and evaluation of cropping systems. *Principes et outils de conception, conduite et evaluation de systemes de culture. Cahiers Agricultures* 12, 387-400.
- OECD, (2013). La volatilité des prix des denrées alimentaires - Perspectives agricoles de l'OCDE et de la FAO. <http://www.oecd.org/site/oecdfoagriculturaloutlook/lavolatilitedesprixdesdenreesalimentaires-perspectivesagricolesdelocdeetdelafao.htm>. Consulté le 22/11/2013.
- Oerke, E. C. (2006). Crop losses to pests. *Journal of Agricultural Science* 144, 31-43.
- Oerke, E. C., and Dehne, H. W. (1997). Global crop production and the efficacy of crop protection-current situation and future trends. *European Journal of Plant Pathology* 103, 203-215.
- Ogg, A. G., Jr., and Parker, R. (1989). Control of volunteer crop plants. *Extension Bulletin - Cooperative Extension, College of Agriculture, Washington State University*, 4 pp.
- OILB-Srop, 1973. Statuts, *Bull.Srop*, (1), 25p.
- Ohmart, C. (2009). IPM implementation - overcoming barriers to grower adoption. *Pesticides News*, 20-22.
- Olesen, J. E., Jorgensen, L. N., Petersen, J., and Mortensen, J. V. (2003). Effects of rates and timing of nitrogen fertilizer on disease control by fungicides in winter wheat. 2. Crop growth and disease development. *Journal of Agricultural Science* 140, 15-29.
- ONU, 2000. Les objectifs du millénaire pour 2015. <http://www.un.org/fr/millenniumgoals/>. Consulté le 19/11/2013
- Ordonez, M. E., and Kolmer, J. A. (2007). Virulence phenotypes of a worldwide collection of *Puccinia triticina* from durum wheat. *Phytopathology* 97, 344-351.
- Osborne, L. E., and Stein, J. M. (2007). Epidemiology of *Fusarium* head blight on small-grain cereals. *International Journal of Food Microbiology* 119, 103-108.
- Ostman, O., Ekbohm, B., and Bengtsson, J. (2001). Landscape heterogeneity and farming practice influence biological control. *Basic and Applied Ecology* 2, 365-371.
- Pageau, D., Lajeunesse, J., and Savard, M. E. (2009). Effect of harvest date on deoxynivalenol grain content and productivity of barley. *Canadian Journal of Plant Science* 89, 559-567.
- Papaix, J., Goyeau, H., Cheyron, P. d., Monod, H., and Lannou, C. (2011). Influence of cultivated landscape composition on variety resistance: an assessment based on wheat leaf Rust epidemics. *New Phytologist* 191, 1095-1107.
- Payen, D., Rappilly, F., and Galliot, M. (1983). Effect of the sowing date on the climatic potentialities of winter infections of soft winter wheat by eyespot in France

- Influence de la date de semis sur les potentialités climatiques de contaminations hivernales du blé tendre d'hiver par le piétin-verse en France. *Comptes Rendus des Séances de l'Académie d'Agriculture de France* 69, 473-481.
- Pelzer, E., Fortino, G., Bockstaller, C., Angevin, F., Lamine, C., Moonen, C., Vasileiadis, V., Guerin, D., Guichard, L., Reau, R., and Messean, A. (2012). Assessing innovative cropping systems with DEXiPM, a qualitative multi-criteria assessment tool derived from DEXi. *Ecological Indicators* 18, 171-182.
- Pfleeger, T. G., and Mundt, C. C. (1998). Wheat leaf Rust severity as affected by plant density and species proportion in simple communities of wheat and wild oats. *Phytopathology* 88, 708-714.
- Pickett, A. A. (1993). Cereals: seed shedding, dormancy and longevity. In "Aspects of Applied Biology", pp. 17-28.
- Pietravalle, S., Shaw, M. W., Parker, S. R., and Bosch, F. v. d. (2003). Modeling of relationships between weather and *Septoria tritici* epidemics on winter wheat: a critical approach. *Phytopathology* 93, 1329-1339.
- Pimentel, D. (1995). Amounts of pesticides reaching target pests: environmental impacts and ethics. *Journal of Agricultural & Environmental Ethics* 8, 17-29.
- Piyaratne, M. K. D. K., Zhao, H., and Meng, Q. (2013). APHIDSim: a population dynamics model for wheat aphids based on swallowtail catastrophe theory. *Ecological Modelling* 253, 9-16.
- Plaskowska, E., Moszczyńska, E., Matkowski, K., and Kordas, L. (2009). The effect of soil tillage system on health status and grain yield of winter wheat
Wpływ sposobu uprawy roli na zdrowotność i plonowanie pszenicy ozimej. *Progress in Plant Protection* 49, 2058-2062.
- Polley, R. W., and Clarkson, J. D. S. (1978). Forecasting cereal disease epidemics. *Plant disease epidemiology.*, 141-150.
- Rabasse, J. M., and Dedryver, C. A. (1983). Biology of cereal aphids in western France. III. Effect of hymenopteran parasites on populations of *Sitobion avenae* F., *Metopolophium dirhodum* Wik. and *Rhopalosiphum padi* L
Biologie des pucerons des céréales dans l'Ouest de la France. III. Action des hyménoptères parasites sur les populations de *Sitobion avenae* F., *Metopolophium dirhodum* Wik. et *Rhopalosiphum padi* L. *Agronomie* 3, 779-790.
- Rabbinge, R., Ward, S.A., Van laar, H.H., (1989). *Simulation and Systems Management in Crop Protection*. Pudoc, Wageningen, 420p.
- Rader, T., Racca, P., Jorg, E., and Hau, B. (2007). PUCREC/PUCTRI - a decision support system for the control of leaf Rust of winter wheat and winter rye. *Bulletin OEPP/EPPO Bulletin* 37, 378-382.
- Randolph, T. L., Peairs, F. B., Merrill, S., Koch, M., and Walker, C. B. (2007). Yield response to Russian wheat aphid (Homoptera: Aphididae) in mixtures of resistant and susceptible winter wheats. *Southwestern Entomologist* 32, 7-15.
- Rapilly, F., and Jolivet, E. (1976). Construction of a model (EPISEPT) allowing simulation of an epidemic of *Septoria nodorum* Berk. on wheat
Construction d'un modèle (EPISEPT) permettant la simulation d'une épidémie de *Septoria nodorum* Berk. sur blé. *Revue de Statistique Appliquée* 24, 31-60.
- Reau R. Et Doré T., (2008). Systèmes de culture innovants et durables. Quelles méthodes pour les mettre au point et les évaluer ? Editions Educagri. Dijon, 168p.
- Reich, P. B., Wright, I. J., Cavender-Bares, J., Craine, J. M., Oleksyn, J., Westoby, M., and Walters, M. B. (2003). The evolution of plant functional variation: traits,

- spectra, and strategies. *International Journal of Plant Sciences* 164, S143-S164.
- Reis, E. M. (1988). Quantification of propagules of *Gibberella zeae* in the air by means of spore traps. *Quantificacao de propagulos de Gibberella zeae no ar atraves de armadilhas de esporos. Fitopatologia Brasileira* 13, 324-327.
- Ricci, P., Bui, S., Lamine, C. (2011). *Repenser la protection des cultures. Innovations et transitions. Éditions Quae*, 224 p
- RMT Systèmes de Cultures Innovants, (2013)
<http://www.systemesdecultureinnovants.org>. Consulté le 22/11/2013.
- Robert, C., Andrieu, B., Fournier, C., Gouache, D., Gate, P., and Ney, B. (2009). "SEPTO3D: a model to analyze the effects of wheat canopy structure on epidemics of septoria. SEPTO3D: un modele pour analyser les effets de la structure des couverts de ble sur les epidemies de septoriose." *AFPP, 9ème conférence internationale sur les maladies des plantes, Tours, France, 8 et 9 Décembre 2009* 2009 pp. 472-482.
- Robert, C., Bancal, M. O., and Lannou, C. (2002). Wheat leaf Rust uredospore production and carbon and nitrogen export in relation to lesion size and density. *Phytopathology* 92, 762-768.
- Robert, C., Bancal, M. O., and Lannou, C. (2004a). Wheat leaf Rust uredospore production on adult plants: influence of leaf nitrogen content and *Septoria tritici* blotch. *Phytopathology* 94, 712-721.
- Robert, C., Bancal, M. O., Nicolas, P., Lannou, C., and Ney, B. (2004b). Analysis and modelling of effects of leaf Rust and *Septoria tritici* blotch on wheat growth. *Journal of Experimental Botany* 55, 1079-1094.
- Robert, C., Fournier, C., Andrieu, B., and Ney, B. (2008). Coupling a 3D virtual wheat (*Triticum aestivum*) plant model with a *Septoria tritici* epidemic model (Septo3D): a new approach to investigate plant-pathogen interactions linked to canopy architecture. *Functional Plant Biology* 35, 997-1013.
- Robin, M. H., and Colbach N., L. P., Monfort F., Cholez C., Debaeke P., Aubertot J.N. (2013). Injury Profile SIMulator, a hierarchical aggregative modelling framework to predict an injury profile as a function of cropping practices, and abiotic and biotic environment. II. Proof of concept: design and evaluation of IPSIM-Wheat-Eyespot, a model that predicts eyespot injuries on winter wheat. (P. ONE, ed.), pp. Volume 8, Issue 10, e75829.
- Roche, R., Bancal, M. O., Gagnaire, N., and Huber, L. (2008). Potential impact of climate change on Brown wheat Rust: a preliminary study based on biophysical modelling of infection events and plant-pathogen interactions. *Aspects of Applied Biology*, 135-142.
- Rocque, B. d. I. (1991). Two operational models for forecasting the risk of wheat Brown Rust and dates for treatment
 Rouille brune du ble: prevision des risques et des dates de traitement. *Presentation de deux modeles operationnels. Bulletin OEPP* 21, 469-476.
- Roelfs, A. P. (1989). Epidemiology of the cereal Rusts in North America. *Canadian Journal of Plant Pathology* 11, 86-90.
- Roelfs, A. P., Singh, R. P., and Saari, E. E. (1992). Rust diseases of wheat: concepts and methods of disease management. *Rust diseases of wheat: concepts and methods of disease management.*, vi + 81 pp.
- Rolland, B., Bouchard, C., Loyce, C., Meynard, J. M., Guyomard, H., Lonnet, P., and Doussinault, G. (2003). Cropping systems for low levels of inputs for hardy varieties of soft wheat: an alternative for reconciling economy and environment

- des itinéraires techniques à bas niveaux d'intrants pour des variétés rustiques de blé tendre: une alternative pour concilier économie et environnement. *Courrier de l'Environnement de l'INRA*, 47-62.
- Roschewitz, I., Hucker, M., Tschardtke, T., and Thies, C. (2005). The influence of landscape context and farming practices on parasitism of cereal aphids. *Agriculture, Ecosystems & Environment* 108, 218-227.
- Rossi, V., Racca, P., Giosue, S., Pancaldi, D., and Alberti, I. (1997). A simulation model for the development of Brown Rust epidemics in winter wheat. *European Journal of Plant Pathology* 103, 453-465.
- Rossi, V., Racca, P., Pancaldi, D., and Alberti, I. (1996). Appearance of Puccinia recondita f.sp. tritici on winter wheat: a simulation model. In "Bulletin OEPP", Vol. 26.
- Rossing, W. A. H. (1991). Simulation of damage in winter wheat caused by the grain aphid *Sitobion avenae*. 2. Construction and evaluation of a simulation model. *Netherlands Journal of Plant Pathology* 97, 25-54.
- Rouzet, J., and Murer, F. (1995). Validation of PRESEPT, a model for forecasting the risk of Septoria on winter wheat. Validation du modèle PRESEPT prévision du risque septorioses sur blé d'hiver. *Mededelingen - Faculteit Landbouwkundige en Toegepaste Biologische Wetenschappen, Universiteit Gent* 60, 453-458.
- Rusch, A., and Sarthou, J. P. (2013). Agro-ecological management of crop pests. *Gestion agroécologique des ravageurs des cultures. Biofutur*, 33-36.
- Rusch, A., Valantin-Morison, M., Sarthou, J. P., and Roger-Estrade, J. (2013). Effect of crop management and landscape context on insect pest populations and crop damage. *Agriculture, Ecosystems & Environment* 166, 118-125.
- Sache, I., Suffert, F., and Huber, L. (2000a). A field evaluation of the effect of rain on wheat Rust epidemics. *Acta Phytopathologica et Entomologica Hungarica* 35, 273-277.
- Sache, I., Suffert, F., and Huber, L. (2000b). A field evaluation of the effect of rain on wheat Rust epidemics. *Acta Phytopathologica et Entomologica Hungarica* 35, 273-277.
- Sadok, W., Angevin, F., Bergez, J. E., Bockstaller, C., Colomb, B., Guichard, L., Reau, R., Messean, A., and 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, 447-461.
- Saint-Jean, S., Kerhornou, B., Derbali, F., Leconte, M., Vallavieille-Pope, C. d., and Huber, L. (2008). Role of rain-splash in the progress of Septoria leaf blotch within a winter wheat variety mixture. *Aspects of Applied Biology*, 49-54.
- Samborski, D. J. (1985). The cereal Rusts. Volume II. Diseases, distribution, epidemiology, and control. Part I. Wheat leaf Rust (39-59). Academic Press. Inc. (London) Ltd., London; UK.
- Sanogo, S., and Yang, X. B. (2004). Overview of selected multivariate statistical methods and their use in phytopathological research. *Phytopathology* 94, 1004-1006.
- Savary, S., Madden, L.V., Zadoks, J.C., (1995). Use of Categorical Information and Correspondence Analysis in Plant Disease Epidemiology. *Advances in Botanical Research*, 21.
- Savary, S. (1987). A survey of fungal diseases of groundnut (*Arachis hypogaea*) in the Ivory Coast. I. Survey methods and descriptive study: cropping techniques and the main diseases.

- Enquête sur les maladies fongiques de l'arachide (*Arachis hypogaea*) en Cote-d'Ivoire. I. Méthodes d'enquête et étude descriptive: les conditions culturales et les principales maladies. *Netherlands Journal of Plant Pathology* 93, 167-188.
- Seck, M., Roelfs, A. P., and Teng, P. S. (1988). Effect of leaf Rust (*Puccinia recondita tritici*) on yield of four isogenic wheat lines. *Crop Protection* 7, 39-42.
- Savary, S., Willocquet, L., Elazegui, F. A., Castilla, N. P., and Teng, P. S. (2000a). Rice pest constraints in tropical Asia: quantification of yield losses due to rice pests in a range of production situations. *Plant Disease* 84, 357-369.
- Savary, S., Willocquet, L., Elazegui, F. A., Teng, P. S., Pham Van, D., Zhu, D., Tang, Q., Huang, S., Lin, X., Singh, H. M., and Srivastava, R. K. (2000b). Rice pest constraints in tropical Asia: characterization of injury profiles in relation to production situations. *Plant Disease* 84, 341-37.
- Schaafsma, A. W., Nicol, R. W., Savard, M. E., Sinha, R. C., Reid, L. M., and Rottinghaus, G. (1998). Analysis of *Fusarium* toxins in maize and wheat using thin layer chromatography. *Mycopathologia* 142, 107-113.
- Sebillotte, M. (1990). Some concepts for analysing farming and cropping systems and for understanding their different effects. *Proceedings - Congress of the European Society for Agronomy.*, 5 O 00 1-16.
- Shaw, M. W., and Royle, D. J. (1989). Airborne inoculum as a major source of *Septoria tritici* (*Mycosphaerella graminicola*) infections in winter wheat crops in the UK. *Plant Pathology* 38, 35-43.
- Shoffner, A. V., and Tooker, J. F. (2013). The potential of genotypically diverse cultivar mixtures to moderate aphid populations in wheat (*Triticum aestivum* L.). *Arthropod - Plant Interactions* 7, 33-43.
- Simon, M. R., and Cordo, C. A. (1999). Diallel analysis of incubation and latent period of *Septoria tritici* at two growth stages of wheat. *Journal of Genetics & Breeding* 53, 73-78.
- Simon, M. R., Cordo, C. A., Perello, A. E., and Struik, P. C. (2003). Influence of nitrogen supply on the susceptibility of wheat to *Septoria tritici*. *Journal of Phytopathology* 151, 283-289.
- Simon, M. R., Perello, A. E., Cordo, C. A., and Struik, P. C. (2002). Influence of *Septoria tritici* on yield, yield components, and test weight of wheat under two nitrogen fertilization conditions. *Crop Science* 42, 1974-1981.
- Simpson, D. R., Weston, G. E., Turner, J. A., Jennings, P., and Nicholson, P. (2001). Differential control of head blight pathogens of wheat by fungicides and consequences for mycotoxin contamination of grain. *European Journal of Plant Pathology* 107, 421-431.
- Skirvin, D. J., Perry, J. N., and Harrington, R. (1997). A model describing the population dynamics of *Sitobion avenae* and *Coccinella septempunctata*. *Ecological Modelling* 96, 29-40.
- Steinkellner, S., and Langer, I. (2004). Impact of tillage on the incidence of *Fusarium spp.* in soil. *Plant and Soil* 267, 13-22.
- Stoate, C., Boatman, N. D., Borralho, R. J., Carvalho, C. R., Snoo, G. R. d., and Eden, P. (2001). Ecological impacts of arable intensification in Europe. *Journal of Environmental Management* 63, 337-365.
- Stockle, C. O., Martin, S. A., and Campbell, G. S. (1994). CropSyst, a cropping systems simulation model: water/nitrogen budgets and crop yield. *Agricultural Systems* 46, 335-359.

- Subba Rao, K. V., Berggren G.T., Snow J.P. (1990). Caractérisation of Wheat Leaf Rust Epidemics in Louisiana. Vol. 80, pp. 402-410. *Phytopathology*.
- Subedi, K. D., Ma, B. L., and Xue, A. G. (2007). Planting date and nitrogen effects on fusarium head blight and leaf spotting diseases in spring wheat. *Agronomy Journal* 99, 113-121.
- Suffert, F., and Sache, I. (2011). Relative importance of different types of inoculum to the establishment of *Mycosphaerella graminicola* in wheat crops in north-west Europe. *Plant Pathology* 60, 878-889.
- Suffert, F., Sache, I., and Lannou, C. (2011). Early stages of septoria tritici blotch epidemics of winter wheat: build-up, overseasoning, and release of primary inoculum. *Plant Pathology* 60, 166-177.
- Sundman V (1973) Description and comparison of microbial populations in ecological studies with the aid of factor analysis. "Modern Methods in the Study of Microbial Ecology" *Bulletins from the Ecological Research Committee, Sweden* 17: 135-140.
- Sutton, J. C. (1982). Epidemiology of wheat head blight and maize ear rot caused by *Fusarium graminearum*. *Canadian Journal of Plant Pathology* 4, 195-209.
- Sutton, J. C., and Vyn, T. J. (1990). Crop sequences and tillage practices in relation to diseases of winter wheat in Ontario. *Canadian Journal of Plant Pathology* 12, 358-368.
- Teich, A. H., and Hamilton, J. R. (1985). Effect of cultural practices, soil phosphorus, potassium, and pH on the incidence of *Fusarium* head blight and deoxynivalenol levels in wheat. *Applied and Environmental Microbiology* 49, 1429-1431.
- Thepot, S., and Gouache, D. (2009). Evaluation of a climate model for predicting the severity of Brown Rust on durum wheat in France
Etude d'un modèle climatique de prevision de la nuisibilite de la rouille brune sur ble dur en France. AFPP, 9eme conference international sur les maladies des plantes, Tours, France, 8 et 9 Decembre 2009, 505-514.
- Thies, C., Roschewitz, I., and Tschardt, T. (2005). The landscape context of cereal aphid-parasitoid interactions. *Proceedings of the Royal Society of London. Series B, Biological Sciences* 272, 203-210.
- Thomas, M. R., Cook, R. J., and King, J. E. (1989). Factors affecting development of *Septoria tritici* in winter wheat and its effect on yield. *Plant Pathology* 38, 246-257.
- Thomas R., (2013). Analyse et modélisation des effets de la situation de production et du système de culture sur la fusariose et le déoxynivalénol pour la culture du blé d'hiver. Mémoire de fin d'études. INP- Ecole d'ingénieur de Purpan.
- Thouvenot, D. (2002). Moisissure et mycotoxine, in: *Mycotoxines: un prochain enjeu de sécurité alimentaire?* CERAAP, pp. 14–17.
- Tilman, D., Cassman, K. G., Matson, P. A., Naylor, R., and Polasky, S. (2002). Agricultural sustainability and intensive production practices. *Nature (London)* 418, 671-677.
- Tompkins, D. K., Fowler, D. B., and Wright, A. T. (1993). Influence of agronomic practices on canopy microclimate and *Septoria* development in no-till winter wheat produced in the Parkland region of Saskatchewan. *Canadian Journal of Plant Science* 73, 331-344.
- UIPP, 2013. Rapport d'activité UIPP 2011/2012. <http://www.uipp.org/Actualites>. Consulté le 13/11/2013

- Union européenne, (2009). Journal officiel. Directive 2009/128/CE du Parlement européen et du Conseil du 21 octobre 2009 instaurant un cadre d'action communautaire pour parvenir à une utilisation des pesticides compatible avec le développement durable.
<http://eurlex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=OJ:L:2009:309:0071:0086:FR:PDF>. consulté le 13/11/2013.
- Vallavieille-Pope, C. d., Huber, L., Leconte, M., and Goyeau, H. (1995). Comparative effects of temperature and interrupted wet periods on germination, penetration and infection of *Puccinia recondita* f.sp. *tritici* and *P. striiformis* on wheat seedlings. *Phytopathology* 85, 409-415.
- Vallavieille-Pope, C. d., Giosue, S., Munk, L., Newton, A. C., Niks, R. E., Ostergard, H., Pons-Kuhnemann, J., Rossi, V., and Sache, I. (2000). Assessment of epidemiological parameters and their use in epidemiological and forecasting models of cereal airborne diseases. *Agronomie* 20, 715-727.
- Vallavieille-Pope, C., Fraj, M.B., Mille, B. et Meynard, J.M., (2005). Les associations de variétés : accroître la biodiversité pour mieux maîtriser les maladies. Dossier de l'environnement de l'INRA, 30, 101-109.
- Van der Wal, A. F, Shearer, B. L., Zadoks, J. C. (1970). Interaction between *Puccinia recondita* f. sp. *tritici* and *Septoria nodorum* on wheat and its effect on yield. *European Journal of Plant Pathology*, 76(4): 261-263.
- Van der Plank J.E. 1963. *Plant Diseases: Epidemics and Control*. Academic Press, New York. 349p.
- 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.
- Vialatte, A., Dedryver, C. A., Camus, D., and Plantegenest, M. (2008). "Toward a decision making tool for insecticide sprays against cereal aphids in spring by Mavrik Flo. A study INRA/Makhteshim Agan France. Vers un outil d'aide a la decision de traitement des pucerons des epis au printemps avec Mavrik Flo. Etude INRA/Makhteshim Agan France."
- Violle C., Navas M.L, Vile D., Kazakou E., Fortunel C., Hummell., Garnier E. (2007). Let the concept of trait be fonctional! *Oikos* 116, 882-892
- WeedML, 2013. <http://www.weedml.org/wtdb/database.html>. Consulté le 9/12/2013.
- Weibull, A. C., and Ostman, O. (2003). Species composition in agroecosystems: the effect of landscape, habitat, and farm management. *Basic and Applied Ecology* 4, 349-361.
- West, J. S., Townsend, J. A., Stevens, M., and Fitt, B. D. L. (2012). Comparative biology of different plant pathogens to estimate effects of climate change on crop diseases in Europe. *European Journal of Plant Pathology* 133, 315-331.
- Wiese, M. V. (1987). *Compendium of wheat diseases*. Second edition. *Compendium of wheat diseases*. Second edition., viii + 112 pp.
- Vilichmeller, V. (1992). Mixed cropping of cereals to suppress plant-diseases and omit pesticide applications. *Biological Agriculture & Horticulture* 8, 299-308.
- Wallach, D., Makowski, D., and Jones, J. (2006). *Working Dynamic Crop Models : Evaluation, Analysis, Parameterization and Application*. (D. Makowski, Jones, J., ed.). Elsevier, 447pp.
- Wallach, D., Goffinet, B., Bergez, J. E., Debaeke, P., Leenhardt, D., and Aubertot, J. N. (2002). The effect of parameter uncertainty on a model with adjusted parameters. *Agronomie* 22, 159-170.

- Werf, H. M. G. v. d., and Zimmer, C. (1998). An indicator of pesticide environmental impact based on a fuzzy expert system. *Chemosphere* 36, 2225-2249.
- Wilkerson, G. G., Wiles, L. J., and Bennett, A. B. (2002). Weed management decision models: pitfalls, perceptions, and possibilities of the economic threshold approach. *Weed Science* 50, 411-424.
- Willocquet, L., Aubertot, J. N., Lebard, S., Robert, C., Lannou, C., and Savary, S. (2008). Simulating multiple pest damage in varying winter wheat production situations. *Field Crops Research* 107, 12-28.
- Willocquet, L., Savary, S., Fernandez, L., Elazegui, F. A., Castilla, N., Zhu, D., Tang, Q., Huang, S., Lin, X., Singh, H. M., and Srivastava, R. K. (2002). Structure and validation of RICEPEST, a production situation-driven, crop growth model simulating rice yield response to multiple pest injuries for tropical Asia. *Ecological Modelling* 153, 247-268.
- Wilson, C., and Tisdell, C. (2001). Why farmers continue to use pesticides despite environmental, health and sustainability costs. *Ecological Economics* 39, 449-462.
- Zadoks, J. C., and Schein, R. D. (1979). Epidemiology and plant disease management. *Epidemiology and plant disease management.*, 427 pp.
- Zadoks, J. C. a. B., J.J (1985). "Epidemiology in europeThe cereal Rusts. Volume II. Diseases, distribution, epidemiology, and control," Academic Press, Orlando.
- Zadoks, J. C. (1984). A quarter century of disease warning, 1958-1983. *Plant Disease* 68, 352-355.
- Zadoks, J. C. (1988). EPIPPE: research, development and application of an integrated pest and disease management system for wheat. In "Bulletin SROP", Vol. 11, pp. 82-90.
- Zadoks, J. C. (1993). "Modern crop protection: developments and perspectives," Wageningen Pers, Wageningen Netherlands.
- Zhang, X. Y., Loyce, C., Meynard, J. M., and Monod, H. (2007). Modeling the effect of cultivar resistance on yield losses of winter wheat in natural multiple disease conditions. *European Journal of Agronomy* 26, 384-393.
- Zhang, X. Y., Loyce, C., Meynard, J. M., and Savary, S. (2006). Characterization of multiple disease systems and cultivar susceptibilities for the analysis of yield losses in winter wheat. *Crop Protection* 25, 1013-1023.
- Žnidaršič, M., Bohanec, M., and Zupan, B. (2008). Modelling impacts of cropping systems: Demands and solutions for DEX methodology. *European Journal of Operational Research* 189, 594-608.

Sommaire des Annexes

Annexe 1. Volatilité annualisée des prix réels historiques

Annexe 2. Fréquence et gravité des bioagresseurs du blé

Annexe 3. Descriptif des principaux bioagresseurs du blé

Annexe 4. Symptômes des principaux bioagresseurs du blé.

Annexe 5. Article Published online in PLoS ONE September 2013, volume 8, issue 9, e73202.

Annexe 6. Article Published online in PLoS ONE October 2013, Volume 8, Issue 10, e75829

Annexe7. Utility function used for the calculation of the value of the aggregative attribute “Final incidence of Eyespot” (screenshot of the DEXi software).

Annexe 8. Utility function used for the calculation of the value of the aggregative attribute “Effects of cropping practices” (screenshot of the DEXi software).

Annexe 9. Utility function used for the calculation of the value of the aggregative attribute “Effects of soil and climate” (screenshot of the DEXi software).

Annexe 10. Utility function used for the calculation of the value of the aggregative attribute “Primary inoculum management: interaction between crop sequence and tillage” (screenshot of the DEXi software).

Annexe 11. Utility function used for the calculation of the value of the aggregative attribute “Mitigation through crop status” (screenshot of the DEXi software).

Annexe 12. Utility function used for the calculation of the value of the aggregative attribute “Climate” (screenshot of the DEXi software).

Annexe 13. Available knowledge in the scientific literature describing the effects of Cropping Practices and the Production Situation on the severity of Brown Rust on Wheat. Cropping practices and weather can be favourable (+), unfavourable (-) or neutral (0) to the development of Brown Rust. The intensity of the considered factor is summarised with 4 classes: 0, no effect; +, slight; ++, significant; +++, crucial.

Annexe 14. Tableau récapitulatif des facteurs favorisant la septoriose du blé

Annexe 15. Tableau récapitulatif de la bibliographie décrivant l'effet des différents facteurs qui impactent le développement de la fusariose et la contamination par le déoxynivalénol

Annexe 16. Synthèse bibliographique des modèles existants sur la fusariose

Annexe 17. Synthèse bibliographique des modèles existants sur les teneurs en déoxynivalénol

Annexe 18. Échelles choisies pour les attributs de base des modèles Fusariose et DON

Annexe 19. Structure du modèle IPSIM-Wheat-Aphids

Annexe 20. Présentation de trois modèles de prédiction des infestations en adventices sur blé

Annexe 21. Caractéristiques des principales adventices du blé

Annexe 22. Tableau récapitulatif des facteurs favorisant les adventices du blé

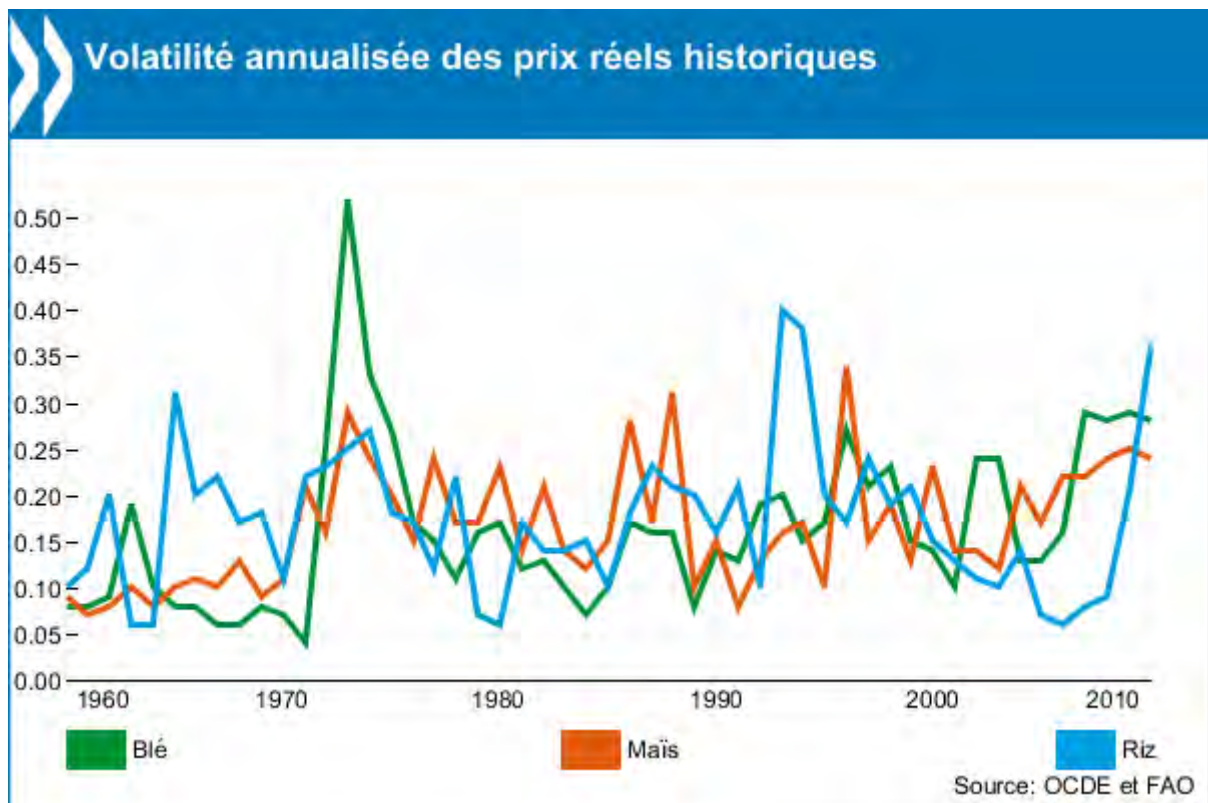
Annexe 23. Sous arbre « gestion stock semencier »

Annexe 24. Sous arbre « efficacité du désherbage en culture »

Annexe 25. Sous arbres « gestion préventive » et « environnement »

Annexe 26. Exemples de transformation sous Excel de variables quantitatives en variables qualitatives

Annexe 1. Volatilité annualisée des prix réels historiques



Note : La volatilité historique des prix est calculée selon la méthode utilisée par le Chicago Board of Trade (CBOT) avec la formule suivante :

$$\sigma = \sqrt{\sum_{i=1}^n [r_t - \mu]^2 / n - 1}$$

r_t est la différence du logarithme des prix P_t : ($r_t = \ln(P_t) - \ln(P_{t-1})$),

μ est le rendement moyen, et n est le nombre d'observations de l'échantillon.

En termes annualisés, multiplié par l'inverse de la racine carrée

du temps, $1/\sqrt{T}$, T représentant la fréquence des observations (jour, mois, etc).

(Food price volatility - OECD-FAO Agricultural Outlook 2011-2020.

<http://www.oecd.org/site/oecdfoagriculturaloutlook/lavolatilitedesprixdesdenreesalimentaires-perspectivesagricolesdelocdeetdelafao.htm>. Consulté le 12/11/2013)

Annexe 2. Fréquence et gravité des bioagresseurs du blé (Délos, 2011).

Légende :

Fréquence moyenne sur une période de 3 campagnes <u>Probabilité du risque(P)</u>	Nuisibilité potentielle : diminution de la quantité récoltée, de la qualité, voire d'effet indirect sur la santé des riverains. <u>Magnitude du risque(M)</u>	<u>Evolution de la fréquence en</u> tendance sur le moyen terme(F)
0 anecdotique ou historique * moins d'un quart du territoire ou dégâts rares	* Moins d'un quart du rendement potentiel	↘ en baisse
** environ moitié du territoire ou dégâts variables	** maximum moitié du rendement potentiel	→ stable
*** tout le territoire ou dégâts fréquents	*** supérieur à la moitié du rendement **** sécurité sanitaire de l'aliment ou impact santé publique	↗ en hausse

Bioagresseurs du blé :

	P	M	F
Virus de la mosaïque du blé	**	***	↗
Caries	*(*)	***	↗
Ergot	*	****	→
Oïdium	***	**	↗
Septoriose (nodorum)	*	***	→
Septoriose (tritici)	*	**	→
Helminthosporiose	*	**	↗
Rouille Brune	***	***	↗
Rouille Jaune	**	***	↗
Rouille Noire	0	***	↘
Piétin Verse	**	**(*)	→
Piétin Echaudage	*(*)	***	↗
Rhizoctone	*	*	↘
Fusariose des épis	**	****	↗
Fusariose du plateau de tallage	**	**	→

Nématodes	*	**	→
Limaces	**	**	→
Taupins	**	*	→
Zabres	*	**	↗
Tordeuses	*	*	↘
Pucerons à l'automne	***	***	→
Pucerons au printemps	**	**	→
Cicadelles	**	***	→
Cécidomyies des fleurs	**	***	↗
Criocères	**	*	→

Annexe 3. Descriptif des principaux bioagresseurs du blé

Nom commun	Nom latin	Conservation	Dispersion	Dynamique	Symptômes	Mécanismes de dommage
Piétin verse	<i>Pseudocercospora herpotrichoides</i>	Endo-inoculum mycélium sur débris récolte, en surface ou dans couches superficielles	spores disséminées par eau de pluie ou par vent sur quelques mètres	Polycyclique (peu de cycles)	du stade épi 1cm à maturité; tache diffuse sous 1° nœud, ocellée, bord brun peu délimité	réduction nutrition hydrominérale + verse
Piétin échaudage	<i>Gaeumannomyces graminis</i>	Endo-inoculum mycélium sur débris enfouis à 5-10cm, (4 ans)	dans le sol par contact racines, instruments,... sur faibles distances	Monocyclique	racines noires, cassantes, épi blanc échaudé	réduction nutrition hydrominérale
Fusariose des tiges	<i>Monographella nivalis</i>	Endo et Allo-inoculum mycélium sur débris enfouis (4 ans), sur débris de paille en surface (2 ans), sur semences	spores disséminées par vent	Polycyclique (peu de cycles)	tache brune diffuse en trait de plume sur 1° entrenœud	réduction nutrition hydrominérale
Oïdium	<i>Erysiphe graminis</i>	Allo et Endo-inoculum ascospores sur débris et sur organes vivants	spores très légères disséminées par vent sur distances élevées	Polycyclique (très nombreux)	pustules blanches d'aspect cotonneux sur feuilles, tiges, gaines, épis	diminution LAI et photosynthèse
Rouille brune	<i>Puccinia recondita</i>	Allo-inoculum sur organes vivants	par vent	Polycyclique (très nombreux)	pustules orange, dispersées sans ordre	diminution LAI et photosynthèse
Rouille jaune	<i>Puccinia striiformis</i>	Allo-inoculum sur organes vivants	par vent	Polycyclique (assez nombreux)	pustules jaunes, dispersées en ligne	diminution LAI et photosynthèse
Septoriose	<i>Septoria tritici</i> <i>Septoria nodorum</i>	Endo et Allo-inoculum : mycélium sur débris à la surface (3 ans), semences	conidies disséminées par pluie et limitée (cirrhes), ascospores disséminées par vent sur distances élevées	Polycyclique (nombreux)	tache allongée losangique se nécrosant au centre, bordée d'un halo jaune, présence de points noirs au centre	diminution LAI et photosynthèse
Fusariose des épis	<i>Microdochium nivale</i> <i>Fusarium roseum</i>	Endo et Allo-inoculum : mycélium sur débris de paille en surface (2 ans)	dissémination locale des spores à partir des résidus et des attaques sur tige; dissémination par vent des ascospores sur distances élevées	Polycyclique (peu nombreux)	cercle brun à la base ou au milieu des glumes, et/ou coloration rose	Echaudage (prélèvement direct sur grain) +mycotoxines

Pucerons d'hiver	<i>Rhopalosiphum padi</i>	Allo-inoculum maintien sur plantes hôtes	dissémination active sur petites distances ou par vent sur distances plus élevées	Polycyclique (très nombreux)	grain petit, ridé, ... présence de fumagine	diminution LAI et photosynthèse transmission virus
Pucerons des épis	<i>Sitobion avenae</i>	Allo-inoculum maintien sur plantes hôtes	dissémination active sur petites distances ou par vent sur distances plus élevées	Polycyclique (très nombreux)	grain petit, ridé, ... présence de fumagine	prélèvement sève direct sur grain transmission virus
Cicadelles vectrices du nanisme (WDV)	<i>Psammotettix alienus</i>	Endo et Allo-inoculum : œuf hivernant	adultes peu mobiles	Polycyclique (peu nombreux)	plante rabougrie, chétive, en ligne, avec des feuilles courtes et jaunissantes (bandes chlorotiques)	diminution LAI et photosynthèse
Cécidomyie des fleurs	<i>Sitodiplosis mosellana (orangée)</i> <i>Contarinia tritici(jaune)</i>	Endo-inoculum : conservation très longue dans le sol, 10 ans	dissémination aérienne sur faibles distances	Monocyclique	grain échaudé, petit, ridé, ...	prélèvement sève direct sur grain
Mosaïque	<i>Polymyxa graminis</i>	Endo-inoculum	dans le sol par contact racines	Polycyclique	feuilles présentant des stries jaunes	Diminution LAI et photosynthèse
Jaunisse nanisante de l'orge	<i>Barley yellow dwarf virus BYDV</i>	Allo -inoculum : conservation sous forme d'œufs d'hiver sur hôte primaire, ou maintien sur plantes hôtes	dissémination par pucerons vecteurs, active sur petites distances ou par vent sur distances plus élevées	Polycyclique (très nombreux)	pas avant épiaison, rougissement extrémité feuille, nanisme, grains ridés	diminution LAI et photosynthèse

Annexe 4. Symptômes des principaux bioagresseurs du blé.

Source et crédits photos : INRA (2000a et 2000b) INRA 2010a. Encyclopédie des ravageurs européens. [<http://www.inra.fr/hyppz/>]

INRA 2010b. Hypermédia en protection des plantes. [<http://www.inra.fr/hyp3/>]



Fusariose des tiges



Piétin verse



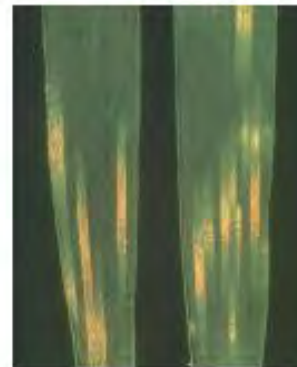
Piétin échaudage



Cécidomyie des fleurs



Rouille brune



Rouille jaune



Oïdium



Septoriose



Fusariose des épis



Jaunisse nanisante de l'orge



Pucerons



Adventices

Annexe 5.

Injury Profile SIMulator, a Qualitative Aggregative Modelling Framework to Predict Crop Injury Profile as a Function of Cropping Practices, and the Abiotic and Biotic Environment. I. Conceptual Bases

Jean-Noël Aubertot^{1,2*}, Marie-Hélène Robin^{1,3}

1 Institut National de la Recherche Agronomique, Unité Mixte de Recherche 1248 Agrosystèmes et Agricultures, Gestion des Ressources, Innovations et Ruralités, Castanet-Tolosan, France, **2** Université Toulouse, Institut National Polytechnique de Toulouse, Unité Mixte de Recherche 1248 Agrosystèmes et Agricultures, Gestion des Ressources, Innovations et Ruralités, Castanet-Tolosan, France, **3** Université de Toulouse, Institut National Polytechnique de Toulouse, Ecole d'Ingénieurs de Purpan, Toulouse, France

Abstract

The limitation of damage caused by pests (plant pathogens, weeds, and animal pests) in any agricultural crop requires integrated management strategies. Although significant efforts have been made to i) develop, and to a lesser extent ii) combine genetic, biological, cultural, physical and chemical control methods in Integrated Pest Management (IPM) strategies (vertical integration), there is a need for tools to help manage Injury Profiles (horizontal integration). Farmers design cropping systems according to their goals, knowledge, cognition and perception of socio-economic and technological drivers as well as their physical, biological, and chemical environment. In return, a given cropping system, in a given production situation will exhibit a unique injury profile, defined as a dynamic vector of the main injuries affecting the crop. This simple description of agroecosystems has been used to develop IPSIM (Injury Profile SIMulator), a modelling framework to predict injury profiles as a function of cropping practices, abiotic and biotic environment. Due to the tremendous complexity of agroecosystems, a simple holistic aggregative approach was chosen instead of attempting to couple detailed models. This paper describes the conceptual bases of IPSIM, an aggregative hierarchical framework and a method to help specify IPSIM for a given crop. A companion paper presents a proof of concept of the proposed approach for a single disease of a major crop (eyespot on wheat). In the future, IPSIM could be used as a tool to help design *ex-ante* IPM strategies at the field scale if coupled with a damage sub-model, and a multicriteria sub-model that assesses the social, environmental, and economic performances of simulated agroecosystems. In addition, IPSIM could also be used to help make diagnoses on commercial fields. It is important to point out that the presented concepts are not crop- or pest-specific and that IPSIM can be used on any crop.

Citation: Aubertot J-N, Robin M-H (2013) Injury Profile SIMulator, a Qualitative Aggregative Modelling Framework to Predict Crop Injury Profile as a Function of Cropping Practices, and the Abiotic and Biotic Environment. I. Conceptual Bases. PLoS ONE 8(9): e73202. doi:10.1371/journal.pone.0073202

Editor: Matteo Convertino, University of Florida, United States of America

Received: February 25, 2013; **Accepted:** July 16, 2013; **Published:** September 3, 2013

Copyright: © 2013 Aubertot, Robin. This is an open-access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License, which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original author and source are credited.

Funding: This study was carried out within a PhD project co-funded by INRA and INPT El Purpan, by the project MICMAC design (ANR-09-STRA-06) supported by the French National Agency for Research (ANR), and by the Programme "Assessing and reducing environmental risks from plant protection products (pesticides)", funded by the French Ministry in charge of Ecology and Sustainable Development (project "ASPIB"). The funders had no role in study design, data collection and analysis, decision to publish, or preparation of the manuscript.

Competing Interests: The authors have declared that no competing interests exist.

* E-mail: Jean-Noel.Aubertot@toulouse.inra.fr

Introduction

Third millennium agriculture must reconcile environmental protection and productivity. The world population is projected to reach 8.7–10 billion by 2050 and annual production will need to increase by 200 million tons by then to meet the projected 470 million ton demand [1]. Several authors attribute the spectacular increase of agricultural production in the second half of the twentieth century to the massive use of products resulting from chemical synthesis [2]; but this intensive production model is nowadays questioned because of public health, agronomic, environmental, and sometimes socio-economic issues. Concepts in crop protection in intensive agricultural production systems changed from destruction of pests (by which we mean, plant pathogens and animal pests in this paper) by the use of pesticides

to pest management with techniques based on the improved knowledge of pest dynamics and their natural enemies and the interaction between pests and crops under the influence of Cropping Practices [3]. It is therefore necessary to combine cultural, genetic, biological, physical and chemical control methods to manage pests through Integrated Pest Management (IPM) strategies in order to maintain the pest population levels below those causing economic losses [4].

True IPM is quite different from the practices recommended up to now [5] and is still faced with agronomic and technical difficulties which can curb its development. Its impact on pests is difficult to estimate because of their multiplicity and of their many interactions within agroecosystems. Studies on the effects of alternative control methods mostly concern a major pest (monospecific approach) while farmers have to manage an injury

profile in a given field, i.e. a combination of injury levels caused by multiple pests (multi-specific approach) [6]. Similarly, the research has focused on the effect of one (or a few) control method(s), but farmers usually combine several operations (which may have only partial effects) to limit pest development. Each technical operation is likely to modify the sanitary status of a crop [7]. In addition, not only do cultural practices interact with each other, but also, one technique can be detrimental to some pests and favourable to others. Pest populations are characterised by a very high level of diversity and complexity because of multiple interactions within and between populations and with biological, physical, and chemical environments. This complexity is one of the constraints to the implementation of IPM, in addition to others [8]. In order to reduce the reliance of cropping systems on pesticides, it is therefore necessary to develop tools to help the “vertical integration” (combination of several control methods) and the “horizontal integration” (simultaneous management of several pests) of IPM strategies. Dynamics of pest populations can lead to combinations of injuries on a crop which can in turn lead to quantitative or qualitative damage, which usually results in economic losses for farmers and more generally for society as a whole. However, these relationships are not linear and depend on the production situation as shown by several authors [6,9,10]. In this paper, we will assume that the production situation is defined by the physical, chemical and biological components, except for the crop, of a given field (or agroecosystem) and its environment, as well as socio-economic drivers that affect farmer’s decisions (adapted from [11]). In this definition, the term “environment” refers to the climate and the territory (i.e. landscape and the associated actors) that can directly or indirectly influence the considered field. In a given production situation, a farmer can design several cropping systems according to his goals, his perception of the socio-economic context and his environment, farm organisation, knowledge and his cognition. However, a given cropping system in a given production situation will be assumed to lead to a unique injury profile.

In order to help design cropping systems, modelling is a key tool [12]. However, because of the complexity of agroecosystems, models usually only address a limited part of agroecosystems. Crop models have been developed for decades but do not take into account interactions with pests (e.g. [13,14]). Epidemiological models *sensu lato* have been developed to represent pest dynamics, often to help decision making for pesticide treatments. However, these models usually take into account rather poorly the critical effects of cropping practices [15] due to their multiple consequences on the crop-pest-environment dynamics [16]. In addition, the majority of these models address single pests (except for models such as EPIPRE [17,18]). So far, the only models that consider injury profiles are damage models [19,20]. However these models do not predict injury profiles but the quantitative damage that they cause. There is thus a strong need to develop an innovative approach to predict injury profiles as a function of production situations and cropping practices. Because of the complexity of the considered systems [21], and the lack of representation of the effects of cropping practices and their interactions, the linkage of available crop models to epidemiological models seems unlikely to happen when considering multiple pests [3]. Even if a crop model was available, together with epidemiological models for diseases, weeds and animal pests, taking into account the crop status and the effects of cropping practices, attempting to link them would certainly lead to a dead end because of the propagation error phenomenon as well as the large number of parameters and input variables needed. Alternatively, one could consider statistical approaches to cope with the impossibility of addressing these issues

when using mechanistic models. However, datasets with observed injury profiles, cropping systems and production situation are scarce and statistical approaches are thus even more unlikely to succeed than mechanistic modelling approaches. As an alternative, a generic modelling framework, called IPSIM for Injury Profile SIMulator is proposed. It is deliberately simple in the way mechanisms are represented because the system being described, i.e. the agroecosystem, is far too complex for a truly mechanistic representation. It is based on a simple qualitative hierarchical aggregative approach to represent the effects of various factors affecting injury profiles. This paper presents the basic principles of IPSIM, describing its implementation in a software program and providing an example of its specification for a given crop. A companion paper [22] provides a proof of concept of this innovative modelling approach in the field of crop protection for an important disease of wheat.

Materials and Methods

Basic Principles of IPSIM

Figure 1 is a schematic representation of an agroecosystem. This figure is the conceptual basis of IPSIM, although its scope is broader than the system directly addressed by IPSIM. According to the farmer’s goals, his farm features, his perception of the environment and of the socio-economic context, as well as his knowledge and cognition, he designs cropping systems that will achieve social, economic and environmental performances, as a function of the production situation. These performances will be highly dependent on the injury profile encountered. The term “cropping system” refers here to “a set of management procedures applied to a given, uniformly treated area, which may be a field, part of a field or a group of fields” [23]. This covers many technical operations, for instance, the choice of the crop sequence, cover cropping, cultivar, tillage practices, date and density of sowing, rate of fertilisation and chemical pest control. The term “system” is used here because these technical choices are inter-dependent [24].

IPSIM is embedded in Figure 1, where its output variable is the injury profile. Input variables of IPSIM are embedded within the three following components: cropping practices, field environment, and physical, chemical and biological components of the field (crop, pests, beneficial and harmless living organisms). An injury profile can thus be seen as the result of hierarchical interactions among the cropping practices and the production situation. Qualitative aggregative hierarchical approaches have been used in several fields to help assess the performances of various options when managing a system: industry (e.g. [25,26]), soil science (e.g. [27]), tourism (e.g. [28,29]). In the field of agronomy, qualitative aggregative hierarchical models have been used for the assessment of the sustainability of cropping systems *ex-ante* or *ex-post* [30–32], the assessment of organic systems [33], the management of Genetically Modified crops (e.g. [34]), the assessment of less-favoured areas for agricultural production (e.g. [35]), the evaluation of energy crops for biogas production (e.g. [36]), the assessment of varieties or cultivars (e.g. [37,38]) and the assessment of the effects of market-gardening cropping systems on soil borne pathogens and animal pests using expert knowledge of advisors [39]. We used this approach to summarise available knowledge in the literature for a given crop and to develop a generic modelling framework for IPM.

Implementation of IPSIM with a Software Program

IPSIM was developed using the DEX method, and is implemented with the DEXi software ([40], <http://www-ai.ijs.si/>

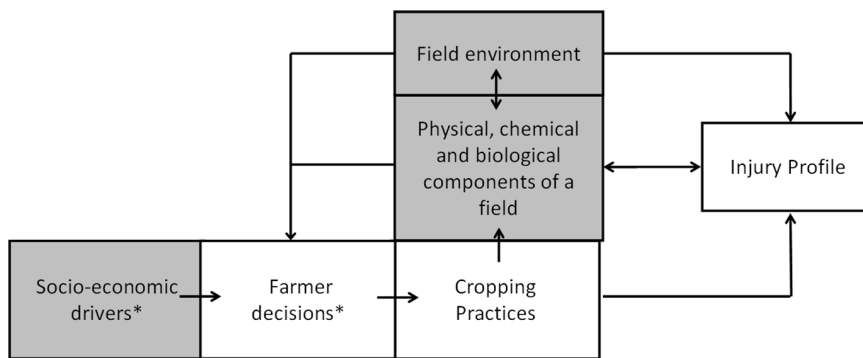


Figure 1. Schematic representation of an agroecosystem and its drivers. In green: components defining the Production Situation (except for the crop). The injury profile is the output variable of IPSIM, whereas its input variables are included within the three following components: cropping practices, field environment, and physical, chemical and biological (crop, pests, beneficials and harmless living organisms) components of the field. *Not taken into account in IPSIM. doi:10.1371/journal.pone.0073202.g001

MarkoBohanec/dexi.html). DEX is a method for qualitative hierarchical multi-attribute decision modelling and support based on a breakdown of a complex decision problem into smaller and less complex sub-problems. This tool is generally used to evaluate and analyse decision problems [27,29,41]. In this study, it is used for the first time to develop a simulation model that represents the behaviour of an agroecosystem and which quality of prediction can be assessed. The modelling framework has the following features [40]. The sub-problems are hierarchically structured into a tree of attributes that represents the “skeleton” of the model. Terminal nodes of the tree, i.e. leaves or basic attributes, represent input variables of the model (and must be specified by the user). The root node represents the main output: an overall assessment of the evaluated scenarios (an injury profile which is defined by cropping practices and elements of the production situation in this case). The internal nodes of the model are called aggregated attributes. All the attributes in the model are qualitative (ordinal and nominal) rather than quantitative (interval) variables. They take only discrete symbolic values usually represented by words. In the DEX method, the aggregation of values up the tree is defined by “utility functions” based on a set of “if-then” aggregation rules. In our approach, we renamed these functions “aggregating tables” since they are not related to the concept of “utility” in decision theory.

IPSIM Structure

The process of building a DEXi model usually involves the following four steps [40]: (1) identifying the attributes, (2) structuring the attributes, (3) defining attribute scales, and (4) defining the aggregating tables. These steps should be followed for the development of IPSIM using the diagram presented Figure 1. However, only the first three steps can be carried out in a generic way. Only the generic aggregating tables will be described here since most of them are crop-specific.

Structure of the attributes used to predict injury profiles. The structure of attributes that predict injury profiles is presented in Figure 2. Each injury can take a limited number of severity levels. For instance, 5 classes (very low, low, medium, high, very high) or 7 classes (nil, very low, low, medium, high, very high and maximum) can be considered in IPSIM. Even if only 10 pests and 5 severity levels are considered for a given crop, a theoretical number of $5^{10} = 9.765625 \times 10^6$ possible injury profiles could thus be simulated with IPSIM. This number is only theoretical since some of these injury profiles are impossible due to

interactions among pests. In order to take into account these interactions, IPSIM first calculates the severity for single pests independently, as if one pest only was present (Figure 2). Then, interactions between pests are taken into account according to the level of each pest and a simple typology of interaction between two pests: high facilitation, low facilitation, no interaction, low reduction, high reduction (Table 1). Table 1 is used to calculate the overall effect of all other pests on the considered pest. Then, the number of pests with high facilitation, low facilitation, no effect, low reduction, high reduction is calculated (Figure 2) and the overall interactions are calculated according to the aggregating tables presented Table 2. Ultimately, the severity of each pest is calculated using the generic aggregating table presented in Table 3 as a function of the severity that would occur without any other pest, and the overall interactions calculated with the aggregating table presented in Table 2.

Structure of the attributes used to predict the severity of a single pest. The input attributes of IPSIM describe cropping

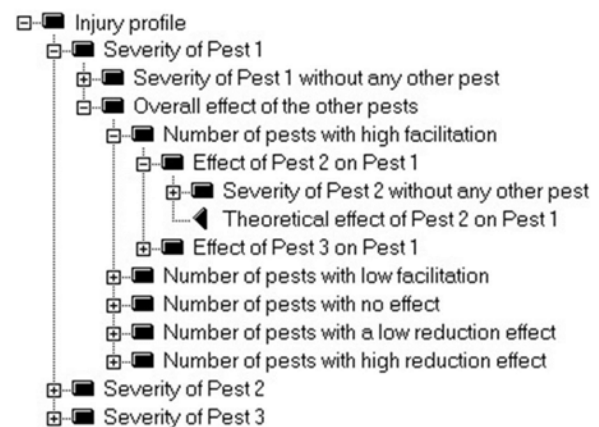


Figure 2. Overall output attributes of IPSIM: description of an injury profile (screenshot of the DEXi software). For the sake of simplicity, only 3 pests are represented in this figure. The severity of a given pest is first calculated independently by IPSIM as if no other pest was present. The aggregated severity of a given pest is then calculated by taking into account the combined effects of all other pests. This is done by considering the theoretical effect of one pest on another according to five levels: high facilitation, low facilitation, no effect, low reduction, high reduction. doi:10.1371/journal.pone.0073202.g002

Table 1. Generic aggregating table used to represent the effect of one pest on another in IPSIM.

Severity of Pest 2 without any other pest	Theoretical effect of Pest 2 on Pest 1	Actual effect of Pest 2 on Pest 1
Maximum, very high or high	High facilitation	High facilitation
Maximum, very high or high	Low facilitation	Low facilitation
Maximum, very high or high	No effect	No effect
Maximum, very high or high	Low reduction	Low reduction
Maximum, very high or high	High reduction	High reduction
Medium	High and low facilitation	Low facilitation
Medium	No effect	No effect
Medium	High and low reduction	Low reduction
Low or very low	High facilitation	Low facilitation
Low or very low	Low facilitation, no effect, low reduction	No effect
Low or very low	High reduction	Low reduction
Nil	Any	No effect

doi:10.1371/journal.pone.0073202.t001

practices, soil and climate (physical and chemical components of the field which partly define the considered production situation), and biological interactions at the territory level (Figure 1). Figure 3 represents the sub-tree used in IPSIM to calculate the severity of a single pest without any interaction with other pests for a given crop. In this sub-tree, cropping practices are composed of cultural, genetic, biological, physical and chemical control actions. Inocula *sensu lato* are supposed to be non limiting in order to keep basic attributes as simple as possible. The most detailed level is cultural control. It is composed of actions for the management of primary inoculum (through the interaction between crop sequence and tillage for arable crops and prophylactic measures for perennial crops); escape strategies through the choice of the sowing date (some crops are less susceptible to some pests after or before some phenological stages) and mitigation through crop status (as a function of the sowing rate, fertilisation, irrigation, pruning for perennial crops, and application of crop growth regulators). The genetic control represents the level of resistance of the cultivar (or the cultivar mixture) to the considered pest. For some pests, biological control can be applied using living organisms released at the field or greenhouse scale. Physical control consists of using any mechanical, thermal, or electromagnetic actions to limit the pest population. Finally, the attribute “Chemical control” describes the efficacy of pesticide treatments and/or use of non-lethal chemicals such as pheromones or repellents. The effect of soil and climate are described independently and later aggregated in a “Soil and climate” attribute. Finally, the effects of elements (e.g. other fields, hedges, forests) at the territory level are taken into account by describing sources of primary inoculum and beneficials at the territory level, as well as the presence of physical barriers that might limit these interactions between the considered field and its surrounding environment. Harmless living organisms (i.e. neither pests nor beneficials) are not specifically represented in the model.

The scales and the aggregating tables used for the attributes presented in Figure 3 cannot be determined in a generic way. They have to be defined according to experimental results, literature, models, or expert knowledge and are specific to the considered crop and pests.

Typology of simulated injury profiles. So far, IPSIM was presented as a simulator of the severity levels for single pests interacting in an injury profile (Figure 2). This detailed information is valuable to researchers, advisers and even farmers to

characterise the agronomic performance of cropping practices in a given production situation with regard to potential losses that various pests may cause. However, IPSIM can provide other information, less precise for the injury profile description, but more pertinent for the diagnosis of the overall effects of cropping practices and the biological environment of the considered field on injury dynamics. We chose to categorise pests according to a simple characteristic that describes their level of dependency to the cropping system: their level of endocyclism (high and low). The term “endocyclic” refers to an organism whose development is mostly restricted to a field and highly depends on the field endo-inoculum. The level of endocyclism of a given pest is therefore directly defined by the level of persistence of primary endo-inoculum *sensu lato* in a given field and its dispersal ability. Pests with a high level of persistence and low dispersal ability are highly endocyclic. Pests with a low level of persistence are slightly endocyclic, regardless their dispersal ability. Pests with a high level of persistence and a high dispersal ability are moderately endocyclic. The inoculum produced by an endocyclic pest in one season can be carried over to the next, thus building up a cumulative inoculum reservoir over the years. Endocyclic organisms are thus highly dependent on field history. The categorisation of pests into two groups (high/medium and low levels of endocyclism) can help identify the main level to address to control them: the field or territory level.

For example, root-knot nematodes (*Meloidogyne* spp.) on horticultural crops, wireworms on potato (*Agriotes* spp.), wheat common bunt (*Tilletia* spp.), take-all on wheat (*Gaeumannomyces graminis* var. *tritici*), dicotyledonous weeds such as *Chenopodium album* and *Fallopia convolvulus* are highly endocyclic pests. However, highly endocyclic pests can sometimes be spread to other fields by anthropic activities (e.g. via agricultural machinery, pruning tools, clothes and boots of greenhouse technicians). This dispersal mechanism will not be taken into account in the model. Aphids on several crops (e.g. *Brevicoryne brassicae*), powdery mildew on grapevine (*Erysiphe necator*), rusts on cereals (e.g. *Puccinia recondita*), codling moth on apple tree (*Cydia pomonella*), and weeds such as some *Asteraceae* (e.g. *Taraxacum dens leonis*) or grassy weeds (e.g. *Bromus sterilis*) are slightly endocyclic pests.

Two aggregating tables were designed to summarise the distribution of final injury levels of single pests using two aggregated variables: the overall final severity of i) highly/

Table 2. Generic aggregating table used to calculate the overall effect on a given pest caused by all the other pests in an injury profile.

Number of pests with high facilitation	Number of pests with low facilitation	Number of pests with no effect	Number of pests with low reduction	Number of pests with high reduction	Overall effects of all other pests
0	0	0	0	0	No effect
0	0	0	0	≥1	High reduction
0	0	0	≥1	0	Low reduction
0	0	0	≥1	≥1	High reduction
0	0	≥1	0	0	No effect
0	0	≥1	0	≥1	High reduction
0	0	≥1	≥1	0	Low reduction
0	0	≥1	≥1	≥1	High reduction
0	≥1	0	0	0	Low facilitation
0	≥1	0	0	≥1	High reduction
0	≥1	0	≥1	0	Low reduction
0	≥1	0	≥1	≥1	Low reduction
0	≥1	≥1	0	0	Low facilitation
0	≥1	≥1	0	≥1	High reduction
0	≥1	≥1	≥1	0	Low reduction
0	≥1	≥1	≥1	≥1	High reduction
≥1	0	0	0	0	High facilitation
≥1	0	0	0	≥1	Low reduction
≥1	0	0	≥1	0	No effect
≥1	0	0	≥1	≥1	Low reduction
≥1	0	≥1	0	0	High facilitation
≥1	0	≥1	0	≥1	Low reduction
≥1	0	≥1	≥1	0	Low reduction
≥1	0	≥1	≥1	≥1	Low reduction
≥1	≥1	0	0	0	High facilitation
≥1	≥1	0	0	≥1	Low reduction
≥1	≥1	0	≥1	0	Low reduction
≥1	≥1	0	≥1	≥1	High reduction
≥1	≥1	≥1	0	0	High facilitation
≥1	≥1	≥1	0	≥1	Low reduction
≥1	≥1	≥1	≥1	0	No effect
≥1	≥1	≥1	≥1	≥1	Low reduction

doi:10.1371/journal.pone.0073202.t002

moderately and ii) slightly endocyclic pests (Table 4). Considering three levels of final injury (low, medium, high) for each of the two endocyclism groups, a range of nine possible generic injury profiles was proposed (Figure 4) for any agricultural productions worldwide (i.e. major crops; vegetables; vineyard; orchards; horticulture; industrial crops, aromatic and medicinal plants; grassland; in field or in Controlled Environment Agriculture). For production situations where injury profile has high final injury levels of highly endocyclic pests (IP7, IP8; IP9; Table 5), a better management of primary inoculum production at the field level should be undertaken (e.g. interaction between by crop sequence and tillage; stubble management, volunteer management, stale seedbeds and sanitation measures for perennial crops). For production situations with injury profiles with high levels of slightly endocyclic pests (IP3, IP6; IP9; Table 5), special attention should be paid to i) the management of inoculum production at the territory level (e.g. spatial distribution of cropping systems,

management of primary inoculum production in the neighbouring fields or waste piles, management of interstitial spaces to promote beneficials); ii) escape strategies (sowing date adaptation); iii) mitigation through the crop status (e.g. cultivar choice, sowing rate, nitrogen fertilisation, irrigation).

Results

Implementation of IPSIM Generic Framework into a Simulation Model, an Example

This article aims to present the whole modelling process: i) development of a conceptual framework; ii) implementation of this conceptual scheme into a simulation model for a simple case; iii) simulation to exemplify potential uses of IPSIM models. The specification of IPSIM will be performed for a simple injury profile on wheat: two highly endocyclic diseases (eyespot and sharp eyespot) and a slightly endocyclic disease (brown rust). Eyespot,

Table 3. Generic aggregating table used to calculate the severity of one pest in interaction with the other pests of an injury profile.

Severity of the considered pest without any other pests	Overall effect of the other pests	Severity of the considered pest under the influence of other pests
Maximum	High facilitation	Maximum
Maximum	Low facilitation	Maximum
Maximum	No effect	Maximum
Maximum	Low reduction	Very high
Maximum	High reduction	High
Very high	High facilitation	Maximum
Very high	Low facilitation	Maximum
Very high	No effect	Very high
Very high	Low reduction	High
Very high	High reduction	Medium
High	High facilitation	Maximum
High	Low facilitation	Very high
High	No effect	High
High	Low reduction	Medium
High	High reduction	Low
Medium	High facilitation	Very high
Medium	Low facilitation	High
Medium	No effect	Medium
Medium	Low reduction	Low
Medium	High reduction	Very low
Low	High facilitation	High
Low	Low facilitation	Medium
Low	No effect	Low
Low	Low reduction	Very low
Low	High reduction	Very low
Very low	High facilitation	Medium
Very low	Low facilitation	Low
Very low	No effect	Very low
Very low	Low reduction	Very low
Very low	High reduction	Very low
Nil	High facilitation	Nil
Nil	Low facilitation	Nil
Nil	No effect	Nil
Nil	Low reduction	Nil
Nil	High reduction	Nil

doi:10.1371/journal.pone.0073202.t003

caused by the necrotrophic and soil-borne fungi *Oculimacula yallundae* and *O. acyiformis*, anamorph *Pseudocercospora herpotrichoides* is considered to be the most important stem-base disease of cereals in temperate countries. In France, sharp eyespot, another soil-borne fungus caused by *Rhizoctonia cerealis*, is one of the minor diseases of the foot disease complex of winter wheat, but is thought to interact strongly with eyespot. The two pathogens show distinct antagonistic behaviour within the infected stem base, which translates into a negative correlation between sharp eyespot and eyespot incidence [42–44]. Finally, brown rust, caused by *Puccinia triticina*, is the most common rust disease of wheat and is now recognised as an important pathogen in wheat production worldwide, causing significant yield losses over large geographical

areas [45]. As opposed to the first two soil-borne diseases which are disseminated over short distances, brown rust is an obligate, airborne disease with conidia which are wind-dispersed over hundreds of kilometres, resulting in rust epidemics on a continental scale [46].

The design of IPSIM-Wheat-Eyespot and the evaluation of its predictive quality is described in a companion paper [22]. For the sake of simplicity and readability, the other two models will not be presented in detail, but their development was similar to the one presented in [22]. The two models for eyespot and sharp eyespot are similar in terms of structure (tree) and aggregating tables because the impact of cropping practices on sharp eyespot is similar to that on eyespot [42]. However, since brown rust is an

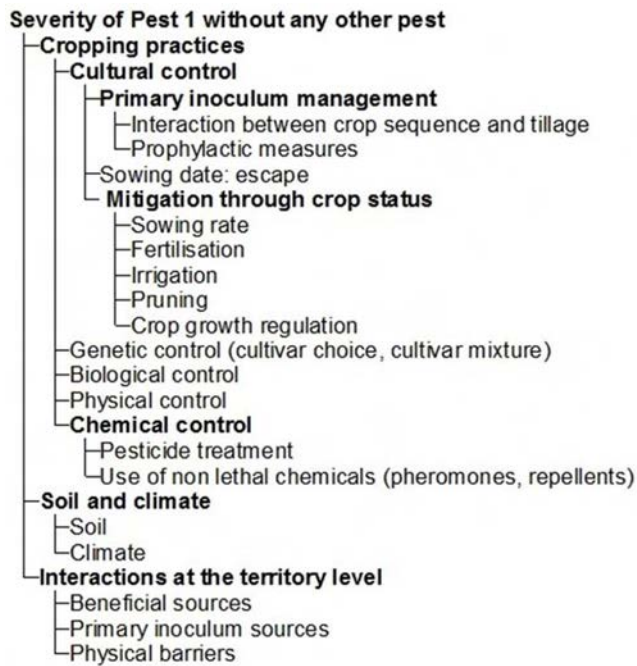


Figure 3. Hierarchical sub-tree to predict the severity of a single pest without any interaction with other pests (screenshot of the DEXi software).

doi:10.1371/journal.pone.0073202.g003

airborne disease, the effects of primary inoculum management at the field scale are less important than for the two soil-borne diseases. For this airborne disease, the main control methods are: i) mitigation through crop status (using a resistant cultivar for instance) and; ii) the management of primary inoculum sources at the territory level. For this schematic injury profile, we will assume that no direct interactions occur between the two soil-borne, stem-base diseases and this airborne, foliar disease.

Simulation Scenarios

The use of the model presented in the first sub-section of the “results” section is exemplified for three contrasting cropping practices in a given production situation (Figure 5). The three cropping practices considered were: intensive, integrated and organic systems. The intensive system is a wheat monoculture with a high level of inputs and a high-yielding cultivar susceptible to diseases, aiming at a high yield level. The integrated system is characterised by a limited use of inputs, with a lower-yielding cultivar than the former system, but less susceptible to diseases, a short wheat rotation, and a satisfactory yield level. The organic system is characterised by low inputs, with a disease-resistant cultivar with a limited yield, associated with a long wheat rotation and appropriate crop management. The three systems were tested in the same production situation, with a weather scenario favourable to the development of the considered diseases.

Simulation Results

The DEXi software computed the aggregated attribute values of the model presented in the first sub-section of the “results”. In the same production situation, the three cropping practices led to contrasting injury profiles. In the absence of estimates of potential yield losses caused by these injury profiles, it is difficult to provide direct recommendations for cropping practices adaptations. However, these simulations enable a diagnosis in terms of pest

development for the three simulated systems. The intensive system led to IP4, i.e. a medium final injury level for highly endocyclic pests associated with a low final injury level for slightly endocyclic pests (Figure 5). For this system, the model suggests that a better management of primary inoculum of the pathogen responsible for eyespot injury should be considered. The integrated system led to IP2, i.e. a low final injury level for highly endocyclic pests associated with a medium final injury level for slightly endocyclic pests (Figure 5). For this system, the model suggests that a better control of brown rust through the use of a more resistant cultivar or the use of a low-dose fungicide, provided that it would be economically sound. The organic system led to IP1, i.e. a low final injury level for highly endocyclic pests associated with a low final injury level for slightly endocyclic pests (Figure 5). This is consistent with the associated cropping practices which aims at minimising pest development by combining prophylactic measures with partial effects. It is important to underline that this diagnosis did not address yield losses, but focused only on injury.

Discussion

Potential Uses of IPSIM Models

These simulations illustrate how IPSIM can be used to assess *ex-ante* the performance of various cropping systems with regard to the control of pest injury on a given crop. This information is useful when designing innovative cropping systems, either by prototyping, e.g. [47], simulation, e.g. [48], or expert knowledge, e.g. [12]. Since climate significantly affects injury profiles, weather frequency analyses are needed, using a set of input variables describing a wide range of climatic scenarios so that the information provided by IPSIM is robust in the face of weather variability. However, IPSIM cannot be seen as a model to design innovative cropping systems *in silico* for two major reasons. First, crop damage is not simulated by IPSIM, which makes it difficult to rank pests with respect to the crop losses they cause. Second, the social, economic and environmental performance of the simulated cropping systems are not calculated. To tackle this problem, IPSIM could be coupled to a damage model (such as RICEPEST [6,19,20] or WHEATPEST [20]) that would predict yield losses as a function of the injury profiles encountered and other relevant variables. Alternatively, a crop model (e.g. STICS [14]) could be used, with a set of single damage functions (such as the ones used in WHEATPEST [20]), and coupled with IPSIM. Then, once the damage caused by a given injury profile in a given production situation has been predicted, a more general framework, such as MASC, [30] or DEXiPM, [49], could be used to predict the social, economic and environmental performance of the tested systems in a given production situation. This approach will help design innovative cropping systems less vulnerable to pests. Using that modelling framework, IPSIM would be the missing link to fill the gap between crop models that can help predict performance of pest-free cropping systems and epidemiological models that generally do not represent the effects of crop status under the influence of cropping practices. In addition, models developed with IPSIM could be used to create typologies of injury profiles at a regional, national, continental or even worldwide scale, using a schematic description of soil and climate, together with a description of the diversity of cropping practices. This should reveal the main injury profiles encountered and help design strategies to control them with better vertical and horizontal integration of IPM. If the corresponding damage models were available, the typology produced could help prioritise objectively research efforts on the main harmful pests.

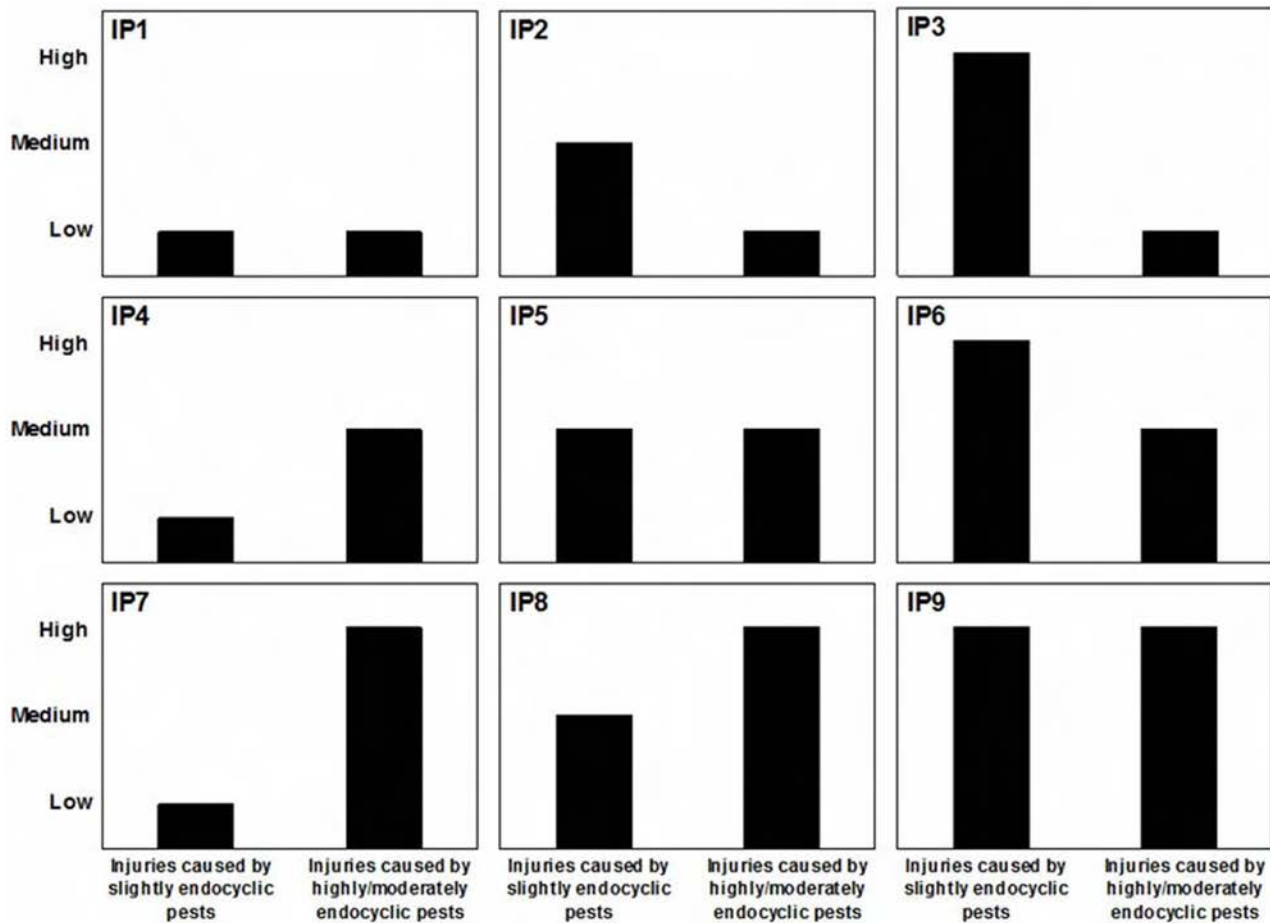


Figure 4. Typology of injuries caused by multiple pests on a crop for given Cropping Practices in a given Production Situation using nine generic Injury Profiles (IP1–IP9). These Injury Profiles are determined by the final levels of the injuries caused by slightly and highly/moderately endocyclic pests (plant pathogens, weeds and animal pests). They can be used to perform cross-cutting analyses for a wide range of agricultural productions.

doi:10.1371/journal.pone.0073202.g004

IPSIM could also be used in an *ex-post* analysis to understand the behaviour of commercial field or experimental plots. Finally, it can be viewed as a communication tool for groups, as well as to teach practitioners and students. Knowledge of several scientific fields

involved in crop protection, as well as several types of expertise (of scientists, extension engineers, or farmers) can be built into IPSIM, offering a framework for these various communities to interact and combine their knowledge.

Table 4. Generic aggregating table used to define the level of severity of slightly endocyclic pests in an Injury Profile as a function of the final injury level of single pests.

Number of slightly endocyclic pests with a very high or maximum final injury level	Number of slightly endocyclic pests with a low, medium or high final injury level	Number of slightly endocyclic pests with a null or very low final injury level	Overall severity of slightly endocyclic pests in the Injury Profile
>1	>1	>1	High
>1	>1	0	High
>1	0	>1	High
>1	0	0	High
0	>1	>1	Medium
0	>1	0	Medium
0	0	>1	Low
0	0	0	Low

The same aggregating table is used to define the level of severity of highly/moderately endocyclic pests.

doi:10.1371/journal.pone.0073202.t004

Table 5. Equivalence between features of qualitative models developed within the IPSIM framework and quantitative simulation models.

Feature	Qualitative simulation models such as the ones developed with the IPSIM framework	Quantitative simulation models
Type of input variables	Nominal, ordinal, or interval	Interval
Type of state variables	Ordinal	Interval
Type of output variables	Ordinal (can be transformed into static interval or even dynamic interval)	Interval
Model structure	Aggregation tree	Equations
Specification of the model structure	Aggregating tables	Parameters
Analysis of model's behaviour	Table of local and global weights for each input and aggregated attributes	Sensitivity analyses to input variables and parameters
Measures of agreement (non exhaustive)	Proportion of correctly predicted ordinal classes; non parametric Wilcoxon signed rank test to analyse if the distribution of errors is significantly biased or not; matched marginal distribution analysis or joint distribution analysis in a square contingency table	Bias; Mean Absolute Error; Root Mean Squared Error; Efficiency

doi:10.1371/journal.pone.0073202.t005

Limitations of the Approach

Like any other model, the predictive quality of IPSIM should be assessed prior to its use. This highlights the urgent need to collect data in commercial fields describing the input and output variables of IPSIM (*i.e.* cropping practices, soil and climate, field environment, injury profiles), along with the social, economic and environmental performances of the monitored agroecosystems. It is important to also add measurements of state variables characterising the crop status (e.g. biomass per area unit, Leaf Area Index) in order to better describe important state variables of the agroecosystem for other possible future analyses of the created datasets. However, due to the lack of datasets containing a description of injury profiles, the confidence that users may have in IPSIM models could also be enhanced by comparing simulation outputs with their own expertise to identify any mismatches. All the information contained within IPSIM models is held in the hierarchical trees and the associated aggregating tables. One of the consequences of this specificity of models developed with the IPSIM framework is that, once developed, the predictive quality of the models can be enhanced easily using experimental datasets by modifying aggregating tables, and, if need be, the structure of the model.

The possible injury profiles that IPSIM models can simulate are numerous. However, observations tend to show that the diversity of injury profiles encountered in commercial fields is much less than the structure of IPSIM models can generate. This results from two mechanisms. First, pests can interact directly (through facilitation, predation, competition for the same ecological niche) or indirectly (through modification of the biotope). This implies that not all potential theoretical injury levels could occur simultaneously. This is a limitation of IPSIM which does not account for the impact of injuries on crop growth. Secondly, the soil, climate, cropping practices and landscape occurring in a given territory might not be diverse enough to lead to all theoretical injury levels (for instance, the theoretical injury profile with all the forms of injury at their maximum level does not exist in reality). Another limitation of IPSIM is the way that interactions between pests are represented. If n pests are considered, $n(n-1)$ interactions are to be described. This is similar to the three-body (or n -body) problem in physics, which has a global analytical solution in the form of convergent power series [50], but that has to be approximated in

practice because they converge too slowly. IPSIM models approximate interactions among injuries by arbitrarily calculating the global interaction that would occur between a given injury and the rest of the injury profile defined as the sum of single injuries simulated without taking into account interactions among pests. However, this approximation certainly appears negligible as compared to other necessary simplification hypotheses.

From the conceptual viewpoint, it could be asked why the crop which is entered in the field biological component (Figure 1) does not appear at the first level of the IPSIM tree. After all, pests only experience physical, chemical and biological interactions within agroecosystems and a description of i) the crop status, ii) soil and climate, and iii) the neighbouring environment of the field are indeed the true drivers of pest dynamics. This option was tried when developing IPSIM structure, but led to too complicated a structure, the effect of single cultural operations being overlooked among the numerous levels of the tree. In addition, datasets with a description of cropping practices and injury profiles are extremely scarce. The requirement of additional variables describing the crop status (e.g. in terms of phenology, architecture, biomass, Leaf Area Index) would also lead to greater difficulties in developing IPSIM models and in evaluating its predictive quality.

We recommend to develop models with no more than 7 final injury levels for a single pest. The lack of precision of IPSIM models could be seen as a drawback as compared to quantitative epidemiological models. Firstly this is because these latter models address a much simpler system: a single pest, rather than an injury profile. Secondly, when developing models of complex systems, accuracy should be sought rather than precision. Searching for better precision would certainly lead to an increase in the model's complexity and possibly to a dead end. We believe that the proposed precision of the models that will be developed with the IPSIM framework is more than enough for the main ultimate purpose of the model: helping the design of innovative cropping systems less vulnerable to pests.

Points for Reflection

The presented structure of IPSIM is not exhaustive in terms of control methods that can be undertaken. However, developers of models within the IPSIM framework can always easily modify its structure in order to take into account the effects of control

Attribute	Intensive	Integrated	Organic
Injury profile	IP4	IP2	IP1
Injuries caused by highly endocyclic pests	medium	<i>slight</i>	<i>slight</i>
Severity of eyespot	medium	<i>low</i>	<i>low</i>
Incidence of eyespot without any other pest	medium	<i>very low</i>	<i>very low</i>
Cropping practices	moderately favourable	<i>unfavourable</i>	<i>unfavourable</i>
Primary inoculum management	favourable	<i>unfavourable</i>	<i>unfavourable</i>
Previous crop	host	<i>non host</i>	<i>non host</i>
Pre-previous crop	host	host	<i>non host</i>
Tillage after harvest of the previous crop	non-inversion tillage	non-inversion tillage	<i>inversion tillage</i>
Tillage after harvest of the pre-previous crop	non-inversion tillage	<i>inversion tillage</i>	<i>inversion tillage</i>
Sowing date: escape	early sowing	normal sowing date	<i>late sowing</i>
Mitigation through crop status	favourable	moderately favourable	<i>unfavourable</i>
Cultivar choice	very susceptible to susceptible	moderately susceptible	<i>quite to very resistant</i>
Level of N fertilisation	excess level	<i>balanced level</i>	<i>balanced level</i>
Sowing rate	normal	<i>low</i>	high
Chemical control: use of fungicide	<i>one</i>	none	none
Soil and climate	favourable	favourable	favourable
Soil	favourable	favourable	favourable
Climate	favourable	favourable	favourable
Autumn/winter	very favourable	very favourable	very favourable
Spring	favourable	favourable	favourable
Interactions at the territory level	<i>neutral</i>	<i>neutral</i>	<i>neutral</i>
Beneficial sources	high	high	high
Primary inoculum sources	<i>neutral</i>	<i>neutral</i>	<i>neutral</i>
Severity of sharp eyespot	<i>low</i>	<i>low</i>	<i>low</i>
Incidence of Sharp eyespot on wheat	<i>very low</i>	<i>nil</i>	<i>nil</i>
Cropping practices	favourable	<i>unfavourable</i>	<i>unfavourable</i>
Primary inoculum management	very favourable	<i>unfavourable</i>	<i>unfavourable</i>
Previous crop	host	<i>non host</i>	<i>non host</i>
Pre-previous crop	host	host	<i>non host</i>
Tillage after harvest of the previous crop	non-inversion tillage	non-inversion tillage	<i>inversion tillage</i>
Tillage after harvest of the pre-previous crop	non-inversion tillage	<i>inversion tillage</i>	<i>inversion tillage</i>
Sowing date: escape	early sowing	normal sowing date	<i>late sowing</i>
Mitigation through crop status	moderately favourable	<i>unfavourable</i>	moderately favourable
Cultivar choice	susceptible	susceptible	susceptible
Level of N fertilisation	excess level	<i>balanced level</i>	<i>balanced level</i>
Sowing rate	normal	<i>low</i>	high
Soil and climate	favourable	favourable	favourable
Soil	favourable	favourable	favourable
Climate	favourable	favourable	favourable
Autumn/winter	very favourable	very favourable	very favourable
Spring	favourable	favourable	favourable
Interactions at the territory level	<i>neutral</i>	<i>neutral</i>	<i>neutral</i>
Beneficial sources	high	high	high
Primary inoculum sources	<i>neutral</i>	<i>neutral</i>	<i>neutral</i>
Incidence of eyespot without any other pest	medium	medium	<i>very low</i>
Injuries caused by slightly endocyclic pests	<i>slight</i>	medium	<i>slight</i>
Severity of brown rust without any other pest	<i>low</i>	medium	<i>low</i>
Incidence of brown rust	<i>low</i>	<i>very low</i>	<i>low</i>
Cropping practices	unfavourable	Favourable	unfavourable
Chemical control: use of fungicide	one	none	none
Mitigation through crop status	very favourable	favourable	<i>unfavourable</i>
Cultivar choice	very susceptible to susceptible	moderately susceptible	<i>quite to very resistant</i>
Level of N fertilisation	excess level	<i>balanced level</i>	<i>balanced level</i>
Sowing rate	Medium	<i>Low</i>	High
Sowing date: escape	early sowing	normal sowing date	<i>late sowing</i>
Primary inoculum management	favourable	favourable	<i>unfavourable</i>
Previous crop	host	host	<i>non host</i>
Pre-previous crop	host	<i>non host</i>	<i>non host</i>
Tillage after harvest of the previous crop	non-inversion tillage	non-inversion tillage	<i>inversion tillage</i>
Tillage after harvest of the pre-previous crop	non-inversion tillage	<i>inversion tillage</i>	<i>inversion tillage</i>
Soil and climate	favourable	favourable	favourable
Soil	<i>neutral</i>	<i>neutral</i>	<i>neutral</i>
Climate	favourable	favourable	favourable
Interactions at the territory level	<i>neutral</i>	favourable	favourable
Beneficial sources	high	<i>neutral</i>	<i>neutral</i>
Primary inoculum sources	high	high	<i>neutral</i>

Figure 5. Example of simulation outputs for wheat obtained for three cropping systems (intensive, integrated and organic) in a given production situation (screenshot of the DEXi software). Three pests in interaction were taken into account in these simulations: eyespot, sharp eyespot and brown rust. doi:10.1371/journal.pone.0073202.g005

measures not present in Figure 3. For instance, the effect of cultivar mixtures or intercrops could be implemented, provided that the required knowledge is available.

The main breakthrough of IPSIM is to be able to handle complexity in a simple way. Input variables of the IPSIM models should be simple to provide. Most of these input variables will be

static variables, except for weather variables that will be dynamic. The price to pay to handle the level of ecological complexity (such as defined by Li [51]) addressed by IPSIM is that IPSIM models are static. This is certainly not a problem to predict the consequences of technical options in a given production situation, but could hamper the linkage with dynamic models as suggested earlier. This limitation could easily be overcome by associating the level of final injury predicted by IPSIM models with generic dynamics. In order to do so, exponential, monomolecular, logistic, Gompertz, or Richards models [52] could be used with generic parameters chosen to represent the qualitative ordinal different injury levels predicted by IPSIM models.

The choice of qualitative variables to describe agroecosystems is relevant for several reasons. Firstly, farmers generally rely on a qualitative perception of their environment to make decisions. This suits the formalism of IPSIM. Secondly, because of the complexity of the system, few datasets are available to describe its components, i.e. the production situation, cropping practices and the injury profile. Using qualitative variables enables one to gather and use various existing datasets that were not acquired for the development of IPSIM models. For instance, datasets from diagnoses of commercial fields or even from experiments may not have used the same severity scale for a given disease. The use of qualitative classes allows data from different origins and/or with different precision to be combined. It is possible to associate interval classes with qualitative attributes. For instance, the 7 levels “nil”; “very low”; “low”; “medium”; “high”; “very high”; and “maximum” can be transformed into [0]; [0–20]; [20–40]; [40–60]; [60–80]; [80–100]; [100] intervals of percentage of diseased foliage respectively, if one wants to compare these outputs with observed severities of a disease for instance. Thus, data acquired on various scales can still be combined to strengthen the dataset used to estimate the predictive quality of the model or to improve the aggregating tables.

Table 5 presents the equivalence between features of models developed within the IPSIM framework and more common quantitative simulation models. Input attributes of IPSIM models can be nominal, ordinal or interval variables, unlike quantitative simulation models, which require only interval input variables. The state variables (aggregated attributes) of IPSIM models, including output variables, are ordinal. However, if need be, output variables of IPSIM models can be transformed into interval variables. This transformation can be performed by associating each possible ordinal value with a quantitative value (e.g. static final value of an injury level, or quantitative intervals) or with an injury dynamic. The relationship between variables is described by a tree in aggregative qualitative models, whereas quantitative models use equations. The DEXi software [40] provides a table with the respective weights of input and aggregated attributes on the value of the root node (main output). This table can be seen as an equivalent to a simple sensitivity analysis to input variables for quantitative models, prior to more detailed ones [53]. It is notable that IPSIM models have no parameters. The equivalents of parameters that specify relationships among variables in quanti-

tative models are the aggregating tables. The proportion of situations correctly simulated is a criterion that can be used to characterise the agreement between values simulated with an IPSIM model and observations. In addition, a non-parametric Wilcoxon signed rank test can be used to analyse whether the distribution of errors is significantly biased or not. These criteria can be seen as equivalent to common statistical criteria for quantitative models (Bias, Mean Absolute Error; Root Mean Square Error; Efficiency [54]). At last, methods specific to matched-pairs data with ordered categories can be used. In order to do so, various models comparing matched marginal distributions or analysing the joint distribution in a square contingency table can be applied [55].

The qualitative attributes of IPSIM models can lead to threshold effects. In order to cope with this limitation, a tool, named proDEX was developed to model uncertain expert knowledge [56]. This software offers the definition of probabilistic aggregating tables, where each combination of descendants' values maps to a probability distribution of the aggregated attributes, rather than a single value. In this approach, input values must be categorised prior to their use in the model. Since this process is time-consuming, proDEX allows categorisations to be part of the model definition and the inputs to be entered as interval variables. In combination with probabilistic aggregating tables, categorisations can be made to transform numerical values into probabilistic distributions, eliminating the problem of crisp interval boundaries. Eventually, the proDEX method could permit a useful extension of the modelling approach presented in this paper.

Finally, a website giving online access to all the functionalities of IPSIM is planned. This website will enable researchers, advisors, farmers and students to develop their own models for a wide range of crops.

Conclusion

We believe that IPSIM is a useful innovative modelling framework to help vertical and horizontal integrations for IPM. Its output attributes include nine generic injury profiles that are based on a two-level categorisation of the degree of endocyclism of harmful organisms. These nine injury profiles can be seen as a tool to perform cross-cutting typologies of agroecosystems for various types of crop (arable crops, vegetables, orchards, vineyards, Controlled Environment Agriculture), with regard to the main pests that have to be managed. IPSIM will generate new knowledge by combining various sources of information from experiments, diagnoses of commercial field, models, and expert panels in a simple way, despite the high ecological complexity of the system addressed. The associated companion paper provides a proof of concept of the proposed method for a single pest.

Author Contributions

Analyzed the data: JNA MHR. Contributed reagents/materials/analysis tools: JNA MHR. Wrote the paper: JNA MHR.

References

- Fess TL, Kotcon JB, Benedito VA (2011) Crop breeding for low input agriculture: a sustainable response to feed a growing world population. *Sustainability* 3: 1742–1772.
- Kropff MJ, Bouma J, Jones JW (2001) Systems approaches for the design of sustainable agro-ecosystems. *Agricultural Systems* 70: 369–393.
- Kropff MJ, Teng PS, Rabbinge R (1995) The challenge of linking pest and crop models. *Agricultural Systems* 49: 413–434.
- Birch ANE, Begg GS, Squire GR (2011) How agro-ecological research helps to address food security issues under new IPM and pesticide reduction policies for global crop production systems. *Journal of Experimental Botany* 62: 3251–3261.
- Ferron P, Deguine JP (2005) Crop protection, biological control, habitat management and integrated farming. A review. *Agronomy for Sustainable Development* 25: 17–24.
- Savary S, Willocquet L, Elazegui FA, Teng PS, Pham Van D, et al. (2000) Rice pest constraints in tropical Asia: characterization of injury profiles in relation to production situations. *Plant Disease* 84: 341–337.
- Zadoks JC (1993) Modern crop protection: developments and perspectives; Zadoks JC, editor. Wageningen Netherlands: Wageningen Pers. ix +309 p.
- Jeger MJ (2000) Bottlenecks in IPM. *Crop Protection* 19: 787–792.

9. Zadoks JC (1984) A quarter century of disease warning, 1958–1983. *Plant Disease* 68: 352–355.
10. Daamen RA, Wijnands FG, Vliet Gvd (1989) Epidemics of diseases and pests of winter wheat at different levels of agrochemical input. A study on the possibilities for designing an integrated cropping system. *Journal of Phytopathology* 125: 305–319.
11. Breman H, de Wit CT (1983) Rangeland Productivity and Exploitation in the Sahel. *Science* 221: 1341–1347.
12. Debaeke P, Munier-Jolain N, Bertrand M, Guichard L, Nolot JM, et al. (2009) Iterative design and evaluation of rule-based cropping systems: methodology and case studies. A review. *Agronomy for Sustainable Development* 29: 73–86.
13. Stockle CO, Martin SA, Campbell GS (1994) CropSyst, a cropping systems simulation model: water/nitrogen budgets and crop yield. *Agricultural Systems* 46: 335–359.
14. Brisson N, Mary B, Ripoche D, Jeuffroy MH, Ruget F, et al. (1998) STICS: a generic model for the simulation of crops and their water and nitrogen balances. I. Theory and parameterization applied to wheat and corn. *Agronomie* 18: 311–346.
15. Aubertot JN, Salam MU, Diggle AJ, Dakowska S, Jedryczka M (2006) 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. In: Koopmann B, Cook S, Evans N, Ulber B, editors. *Bulletin OILB/SROP*. 277–285.
16. Bergez JE, Colbach N, Crespo O, Garcia F, Jeuffroy MH, et al. (2010) Designing crop management systems by simulation. *European Journal of Agronomy* 32: 3–9.
17. Rabbinge R, Rijsdijk FH (1983) EPIPARE: a disease and pest management system for winter wheat, taking account of micrometeorological factors. *Bulletin, OEPP* 13: 297–305.
18. Zadoks JC (1988) EPIPARE: research, development and application of an integrated pest and disease management system for wheat. *Bulletin SROP*. 82–90.
19. Willocquet L, Savary S, Fernandez L, Elazegui FA, Castilla N, et al. (2002) Structure and validation of RICEPEST, a production situation-driven, crop growth model simulating rice yield response to multiple pest injuries for tropical Asia. *Ecological Modelling* 153: 247–268.
20. Willocquet L, Aubertot JN, Lebard S, Robert C, Lannou C, et al. (2008) Simulating multiple pest damage in varying winter wheat production situations. *Field Crops Research* 107: 12–28.
21. Savary S, Mille B, Rolland B, Lucas P (2006) Patterns and management of crop multiple pathosystems. *European Journal of Plant Pathology* 115: 123–138.
22. Robin MH, Colbach N, Lucas P, Monfort F, Cholez C, et al. (2013) Injury Profile SIMulator, a hierarchical aggregative modelling framework to predict an injury profile as a function of cropping practices, and the abiotic and biotic environment. II. Proof of concept: design of IPSIM-Wheat-Eyespot. *PLoS ONE*. In press.
23. Sebillotte M (1990) Systèmes de culture, un concept opératoire pour les agronomes, L. Combe, D. Picard, Editors, *Les Systèmes de Culture*, INRA, Paris (1990), 165–196.
24. Meynard JM, Dore T, Lucas P (2003) Agronomic approach: cropping systems and plant diseases. *Comptes Rendus Biologies* 326: 37–46.
25. Oblak L, Novak B, Lipuseck I, Kropivsek J (2007) Launching work orders into production of wood enterprise with the multi-criteria decision-making method. *Zbornik Gozdarstva in Lesarstva*: 33–39.
26. Rozman C, Pazek K, Bavec F, Bavec M, Turk J, et al. (2006) A multi-criteria analysis of spelt food processing alternatives on small organic farms. *Journal of Sustainable Agriculture* 28: 159–179.
27. Griffiths BS, Ball BC, Daniell TJ, Hallett PD, Neilson R, et al. (2010) Integrating soil quality changes to arable agricultural systems following organic matter addition, or adoption of a ley-arable rotation. *Applied Soil Ecology* 46: 43–53.
28. Rozman C, Potocnik M, Pazek K, Borec A, Majkovic D, et al. (2009) A multi-criteria assessment of tourist farm service quality. *Tourism Management* 30: 629–637.
29. Ars MS, Bohanec M (2010) Towards the ecotourism: a decision support model for the assessment of sustainability of mountain huts in the Alps. *Journal of Environmental Management* 91: 2554–2564.
30. Sadok W, Angevin F, Bergez JE, Bockstaller C, Colomb B, et al. (2009) MASC, a qualitative multi-attribute decision model for ex ante assessment of the sustainability of cropping systems. *Agronomy for Sustainable Development* 29: 447–461.
31. Pelzer E, Fortino G, Bockstaller C, Angevin F, Lamine C, et al. (2012) Assessing innovative cropping systems with DEXiPM, a qualitative multi-criteria assessment tool derived from DEXi. *Ecological Indicators* 18: 171–182.
32. Pazek K, Rozman C, Bavec F, Borec A, Bavec M (2010) A multi-criteria decision analysis framework tool for the selection of farm business models on organic mountain farms. *Journal of Sustainable Agriculture* 34: 778–799.
33. Pazek K, Rozman C (2007) The decision support system for supplementary activities on organic farms. *Agricultura (Slovenia)* 5: 15–20.
34. Bohanec M, Messean A, Scatista S, Angevin F, Griffiths B, et al. (2008) A qualitative multi-attribute model for economic and ecological assessment of genetically modified crops. *Ecological Modelling* 215: 247–261.
35. Pazek K, Rozman C, Irgolic A, Turk J (2012) Multicriteria decision model for evaluating less-favoured areas for agricultural production. 47th Croatian and 7th International Symposium on Agriculture, Opatija, Croatia, 13–17 February 2012 Proceedings: 222–226.
36. Vindis P, Stajko D, Berk P, Lakota M (2012) Evaluation of energy crops for biogas production with a combination of simulation modeling and DEX-i multicriteria method. *Polish Journal of Environmental Studies* 21: 763–770.
37. Pazek K, Rozman C, Pavlovic V, Cerenak A, Pavlovic M (2009) The multi-criteria decision model aid for assessment of the crop cultivars (*Humulus lupulus* L.). In: Florijancic T, Luzaic R, editors. *Zbornik Radova 44 Hrvatski i 4 Medunarodni Simpozij Agronoma*, Opatija, Hrvatska, 16–20 Veljace 2009. Osijeku, Hrvatska: Poljoprivredni Fakultet Sveucilista Josipa Jurja Strossmayera u Osijeku. 360–364.
38. Pazek K, Rozman C, Cejvanovic F, Par V, Borec A, et al. (2005) Multi attribute decision model for orchard renewal - case study in Bosnia and Herzegovina. *Agricultura (Slovenia)* 3: 13–20.
39. Tchamitchian M, Collange B, Navarrete M, Peyre G (2011) Multicriteria evaluation of the pathological resilience of soil-based protected cropping systems. In: Dorais M, editor. *Acta Horticulturae*. Leuven, Belgium: International Society for Horticultural Science (ISHS), 1239–1246.
40. Bohanec B (2003) Decision support. In: Mladenac D, Lavrae N, Bohanec M, Moyle S (Eds.). *Data mining and decision support: Integration and collaboration*, Kluwer Academic Publishers 23–35.
41. Delmotte S, Gary C, Ripoche A, Barbier JM, Wery J (2009) Contextualization of on farm *ex-ante* evaluation of the sustainability of innovative cropping systems in viticulture, using a multiple criteria assessment tool (DEXi). Wageningen University and Research Centre. 180–181.
42. Colbach N, Lucas P, Cavelier N, Cavelier A (1997) Influence of cropping system on sharp eyespot in winter wheat. *Crop Protection* 16: 415–422.
43. Reinecke P, Fehrmann H (1979) Rhizoctonia cerealis van der Hoeven on cereals in the Federal Republic of Germany. *Zeitschrift für Pflanzenkrankheiten und Pflanzenschutz* 86: 190–204.
44. Cavelier N, Lucas P, Boulch G (1985) Evolution of the parasite complex *Rhizoctonia cerealis* Van der Hoeven and *Pseudocercospora herpotrichoides* (Fron) Deighton, fungi attacking the stem base of cereals. *Agronomie* 5: 693–700.
45. Kolmer JA (2005) Tracking wheat rust on a continental scale. *Current Opinion in Plant Biology* 8: 441–449.
46. Bolton MD, Kolmer JA, Garvin DF (2008) Wheat leaf rust caused by *Puccinia triticina*. *Molecular Plant Pathology* 9: 563–575.
47. Lançon J, Wery J, Rapidel B, Angokaye M, Gerardeaux E, et al. (2007) An improved methodology for integrated crop management systems. *Agronomy for Sustainable Development* 27: 101–110.
48. Ould-Sidi MM, Lescourret F (2011) Model-based design of integrated production systems: a review. *Agronomy for Sustainable Development* 31: 571–588.
49. Pelzer E, Fortino G, Bockstaller C, Angevin F, Lamine C, et al. (2012) Assessing innovative cropping systems with DEXiPM, a qualitative multi-criteria assessment tool derived from DEXi. *Ecological Indicators* 18: 171–182.
50. Sundman KE (1912) Mémoire sur le problème des trois corps, *Acta Mathematica* 36: 105–179.
51. Li BL (2010) Editorial. *Ecological Complexity* 7: 421–422.
52. Madden LV (2006) Botanical epidemiology: some key advances and its continuing role in disease management. *European Journal of Plant Pathology* 115: 3–23.
53. Carpani M, Bergez JE, Monod H (2012) Sensitivity analysis of a hierarchical qualitative model for sustainability assessment of cropping systems. *Journal Environmental Modelling & Software* 27–28: 15–22.
54. Wallach D (2011) Crop model calibration: a statistical perspective. *Agronomy Journal* 103: 1144–1151.
55. Agresti A (2010) Matched-pairs data with ordered categories. In: *Analysis of ordinal categorical data*. Second edition. Wiley & Sons, Inc. Hoboken, New Jersey, USA. 225–261.
56. Znidarsic M, Bohanec M, Zupan B (2006) proDEX – A DSS tool for environmental decision-making. *Environmental Modelling & Software* 21: 1514–1516.

Annexe 6.

Injury Profile SIMulator, a Qualitative Aggregative Modelling Framework to Predict Injury Profile as a Function of Cropping Practices, and Abiotic and Biotic Environment. II. Proof of Concept: Design of IPSIM-Wheat-Eyespot

Marie-Hélène Robin^{1,2}, Nathalie Colbach³, Philippe Lucas⁴, Françoise Montfort⁴, Célia Cholez^{1,2}, Philippe Debaeke^{1,5}, Jean-Noël Aubertot^{1,5*}

1 Institut National de la Recherche Agronomique, Unité Mixte de Recherche 1248 Agrosystèmes et agricultures, Gestion des ressources, Innovations et Ruralités, Castanet-Tolosan, France, **2** Université de Toulouse, Institut National Polytechnique de Toulouse, Ecole d'Ingénieurs de Purpan, Toulouse, France, **3** Institut National de la Recherche Agronomique, Unité Mixte de Recherche 1347 Agroécologie, Dijon, France, **4** Institut National de la Recherche Agronomique, Unité Mixte de Recherche 1099 Biologie des Organismes et des Populations appliquée à la Protection des Plantes. Le Rheu, France, **5** Université Toulouse, Institut National Polytechnique de Toulouse, Unité Mixte de Recherche 1248 Agrosystèmes et agricultures, Gestion des Ressources, Innovations et Ruralités, Castanet-Tolosan, France

Abstract

IPSIM (Injury Profile SIMulator) is a generic modelling framework presented in a companion paper. It aims at predicting a crop injury profile as a function of cropping practices and abiotic and biotic environment. IPSIM's modelling approach consists of designing a model with an aggregative hierarchical tree of attributes. In order to provide a proof of concept, a model, named IPSIM-Wheat-Eyespot, has been developed with the software DEXi according to the conceptual framework of IPSIM to represent final incidence of eyespot on wheat. This paper briefly presents the pathosystem, the method used to develop IPSIM-Wheat-Eyespot using IPSIM's modelling framework, simulation examples, an evaluation of the predictive quality of the model with a large dataset (526 observed site-years) and a discussion on the benefits and limitations of the approach. IPSIM-Wheat-Eyespot proved to successfully represent the annual variability of the disease, as well as the effects of cropping practices (Efficiency = 0.51, Root Mean Square Error of Prediction = 24%; bias = 5.0%). IPSIM-Wheat-Eyespot does not aim to precisely predict the incidence of eyespot on wheat. It rather aims to rank cropping systems with regard to the risk of eyespot on wheat in a given production situation through *ex ante* evaluations. IPSIM-Wheat-Eyespot can also help perform diagnoses of commercial fields. Its structure is simple and permits to combine available knowledge in the scientific literature (data, models) and expertise. IPSIM-Wheat-Eyespot is now available to help design cropping systems with a low risk of eyespot on wheat in a wide range of production situations, and can help perform diagnoses of commercial fields. In addition, it provides a proof of concept with regard to the modelling approach of IPSIM. IPSIM-Wheat-Eyespot will be a sub-model of IPSIM-Wheat, a model that will predict injury profile on wheat as a function of cropping practices and the production situation.

Citation: Robin M-H, Colbach N, Lucas P, Montfort F, Cholez C, et al. (2013) Injury Profile SIMulator, a Qualitative Aggregative Modelling Framework to Predict Injury Profile as a Function of Cropping Practices, and Abiotic and Biotic Environment. II. Proof of Concept: Design of IPSIM-Wheat-Eyespot. PLoS ONE 8(10): e75829. doi:10.1371/journal.pone.0075829

Editor: Matteo Convertino, University of Florida, United States of America

Received: March 5, 2013; **Accepted:** July 16, 2013; **Published:** October 16, 2013

Copyright: © 2013 Robin et al. This is an open-access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License, which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original author and source are credited.

Funding: This study was carried out within a PhD project co-funded by INRA and INPT El Purpan, by the project MICMAC design (ANR-09-STRA-06) supported by the French National Agency for Research, and by the Programme "Assessing and reducing environmental risks from plant protection products (pesticides)", funded by the French Ministry in charge of Ecology and Sustainable Development (project "ASPIB"). The funders had no role in study design, data collection and analysis, decision to publish, or preparation of the manuscript.

Competing Interests: The authors have declared that no competing interests exist.

* E-mail: Jean-Noel.Aubertot@toulouse.inra.fr

Introduction

Stem base diseases on cereals and grasses are widespread in many eco-regions of the world and cause important production and economic losses. The most detrimental foot and root pathogens on cereals in temperate areas are *Pseudocercospora herpotrichoides*; *Fusarium* spp, *Rhizoctonia cerealis* and *Gaeumannomyces graminis* [1]. Eyespot caused by the necrotrophic and soil-borne fungi *Oculimacula yallundae* and *O. acyiformis*, anamorph *Pseudocercospora herpotrichoides* [2–4] is considered to be the most important

stem base disease of cereals in temperate countries [5]. Under cool and wet conditions in autumn and spring, both species sporulate and infect the stem bases of their hosts. Without any host crops (cereals, ryegrass), the pathogen survives on previously infected stubble, on which splash-dispersed conidia and air-dispersed ascospores are produced [6]. Injuries interfere with the circulation of nutrients and water through the base of the stem [7] leading to a weakening and possibly to a breakage of the stem base, causing lodging before harvest [5,8]. Relative yield losses of up to 50%

have been reported for the most severe attacks on winter wheat with lodging [2,7,9–11].

In the past, the control of eyespot has relied largely on chemical protection [12]. However, due to the development of resistance to the main available fungicides in *O. yallundae* and *O. acyiformis* populations, adaptation of the entire cropping system to control eyespot on wheat is a sound alternative [13,14]. Furthermore, growing concerns about the impact of pesticides on the environment and human health has led to attempts to limit pesticide use [15,16]. Most governments of developed countries have launched national action plans to reduce pesticide use. For instance, the French government has set as a goal to reduce pesticide use by 50% by 2018 if possible [17]. The European Union has proposed to encourage the use of low-pesticide farming as one of its priorities by the Sustainable Use Directive (SUD) (<http://eurlex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=OJ:L:2009:309:0071:0086:FR:PDF>, accessed November 2012).

In addition, the USA decided to support and develop Integrated Pest Management (IPM) nationwide in order to reduce pesticide use [18]. It appears necessary therefore to combine various methods (cultural, genetic and chemical) in IPM strategies [19] to control eyespot on wheat. The main cultural practices that can partly control eyespot through a specific adaptation are: a low host frequency in the crop sequence, infected stubble management through adapted tillage, a late sowing date and low sowing rate [10,20,29]. The genetic control of eyespot consists of using resistant cultivars. There are several known sources of resistance to eyespot, but only three resistance genes have been described so far [21–23].

IPM strategies, based on these control methods, have to be developed, adapted and applied to a wide range of physical, chemical, biological and socio-economic contexts. However, it is extremely difficult to describe the entirety of the cropping practices*environment*crop*pest system because of the tremendous number of interactions [24]. Modelling is certainly the best way to handle such a level of complexity and to help design sustainable innovative cropping systems less reliant on pesticides.

However, crop models do not deal with injuries caused by pests [25] and few pest models integrate the effects of cultural practices because of the difficulty of describing their numerous consequences on the agroecosystem [26]. Thus, different models have been developed to represent eyespot injuries on wheat [27–29] or the associated damage [30]. Among these, only one model takes into account the effect of the cropping system (crop succession, tillage, sowing date, sowing rate, total nitrogen fertiliser and its form) on injuries caused by eyespot [29]. However, this model does not take into account soil and climate, along with some cultural practices that can greatly influence the disease development (e.g. cultivar choice). There is therefore a need for a model that predicts as exhaustively as possible the effect of cropping practices on eyespot on wheat in a given production situation.

In this article, we will define the production situation as the physical, chemical and biological components, except for the crop, of a given field (or agroecosystem), its environment, as well as socio-economic drivers that affect farmers' decisions (adapted from [31,32], [33]). In this definition, “environment” refers to climate and the fraction of the territory that can influence pest dynamics through dispersal of harmful or beneficial organisms. In a given production situation, a farmer can design several cropping systems according to his goals, his perception of the socio-economic context and his environment, farm features, his knowledge and cognition. However, it is assumed that a given cropping system in a given production situation, such as defined above, should lead to a unique injury profile. In IPSIM, production situations are partly described by three components: soil, climate, and the biological

environment of the field [33]. In the approach used here, the farmer's decision-making process and socio-economic drivers are not taken into account.

The conceptual bases of IPSIM have been described in detail by Aubertot and Robin [33]. The generic hierarchical aggregative modelling framework of IPSIM aims at predicting an injury profile as a function of cropping practices, soil, and climate and the biological field environment for any mono-specific crop production (arable crop, perennial or protected crops). In order to test whether this modelling approach could be successfully applied to represent injuries caused by a single pest, a model, named IPSIM-Wheat-Eyespot, has been developed according to the conceptual framework of IPSIM. It aims at predicting the final incidence of eyespot on wheat as a function of the production situation and cropping practices. IPSIM-Wheat-Eyespot gathers available knowledge in the scientific literature (models, experimental results) and expertise and will help design cropping systems with low risk of eyespot on wheat and perform diagnoses of commercial wheat fields. IPSIM-Wheat-Eyespot will be used as a sub-model for IPSIM-Wheat, a model that will predict the injury profile on winter wheat (i.e. the distribution of injuries caused by the most important detrimental pests on wheat [34]). This paper presents the method used to develop IPSIM-Wheat-Eyespot using the conceptual modelling framework of IPSIM [33], an evaluation of its predictive quality and a discussion on the limitations and benefits of the model.

Materials and Methods

Design of IPSIM-Wheat-Eyespot

1. General Approach. IPSIM-Wheat-Eyespot is based on the DEX method, and is implemented with the software DEXi [35]. DEX is a method for qualitative hierarchical multi-attribute decision modelling and support, based on a breakdown of a complex decision problem into smaller and less complex sub-problems, characterised by indicators (or attributes) that are organised hierarchically into a decision tree. These attributes are characterised by their name, a description and a scale. DEXi is generally used to evaluate and analyse decision problems, e.g. [36]. However, the DEX method has been used here in an original way to model complex agroecosystems. IPSIM-Wheat-Eyespot is therefore a hierarchical and qualitative multi-criteria model, allowing the prediction of eyespot injury according to various factors with sometimes opposite effects. IPSIM-Wheat-Eyespot has the following features (derived from [37]):

- i) Processes are hierarchically organised into a tree of attributes that constitutes the structure of the model;
- ii) Terminal attributes of the tree (i.e. leaves or *basic attributes*) are input variables of the model and must be specified by users; the “trunk” of the tree (i.e. the final aggregated attribute) is the main model output variable (final eyespot incidence on wheat); internal nodes are called *aggregated attributes*;
- iii) All model attributes are qualitative variables (nominal or ordinal) rather than quantitative variables. They take only discrete symbolic values, usually represented by words rather than numbers: e.g. “ploughing, stubble disking, rotary harrowing” for nominal variables, “low, medium, high” for ordinal variables;
- iv) The aggregation of values up the tree is defined by aggregating tables for each aggregated attribute based on “if-then” decision rules. These aggregating tables can be seen as equivalents of parameters for quantitative numerical

models, whereas the tree of attributes can be viewed as the equivalent of their mathematical structure.

IPSIM-Wheat-Eyespot was designed in 3 steps [37]: (1) identification and organisation of the attributes, (2) definition of attribute scales, and (3) definition of aggregating tables.

2. Identification and Organisation of Attributes. IPSIM-Wheat-Eyespot aims at predicting the incidence of eyespot on wheat in a given field according to a set of input variables. The spatial scale addressed is the field and the temporal scale is the wheat growing season, although some input variables encompass the crop sequence (up to the pre-preceding crop). IPSIM-Wheat-Eyespot is a static deterministic model.

The hierarchical structure presented in Figure 1 represents the breakdown of factors affecting eyespot final incidence into specific explanatory variables, represented by lower-level attributes. This figure represents the adaptation to eyespot of the model structure presented in Figure 2 by Aubertot and Robin [33].

In all, IPSIM-Wheat-Eyespot has 21 attributes, of which 14 are basic (i.e. input variables) and 7 aggregated. The 14 basic attributes are presented as the terminal leaves of the tree and their levels are aggregated into higher levels according to aggregating tables. They represent input variables of the model. Some of them (e.g. those representing the interactions at the territory level) could be omitted since they do not influence the final output. However, they were kept because these basic attributes will be necessary for the modelling of the whole injury profile on wheat. The aggregated attributes are internal nodes. They represent state variables or the output variable of IPSIM-Wheat-Eyespot. They are determined by lower-level basic attributes [38]. The output of IPSIM-Wheat-Eyespot is represented by the attribute “Final eyespot incidence” (eyespot incidence at the “milky grain”, stage 7: development of fruit on BBCH scale [39]) which is determined by three main factors: cropping practices, soil and climate and the biological environment of the considered field. This is reflected by the hierarchical structure of the model, which consists of three sub-trees of attributes (Figure 1) split into one main part and two smaller ones. The main sub-tree, “Effect of cropping practices”, illustrates the complexity of the effects of cropping practices and the need to consider a

combination of practices in order to evaluate the final eyespot incidence. It uses indicators based on tactical (with a short time-frame) or strategic decisions (with a longer time-frame [40]). These decisions can affect the agroecosystem at several stages.

- i) Eyespot is considered as a highly endocyclic disease (as defined in [33]). Upstream, some cropping practices affect the quantity of the endo-inoculum (initial pathogen population present in the field). Crop sequence and tillage determine the vertical distribution of infected stubble and have proven to be of major importance for eyespot control [41–45]. Nevertheless, the effects of tillage on the disease are controversial in the literature. According to several authors [1,41,46–50], minimum tillage is highly favourable to eyespot development in the presence of preceding host-crop residues in the top layer, whereas ploughing significantly reduces its incidence by burying host-crop residues. These results conflict with those that show that eyespot was more severe after soil inversion than after non-inversion under moist, cool conditions [44–47,51–55]. The possible explanation of this apparent contradiction is that non-inversion is more favourable to antagonistic micro-organisms than ploughing (the microbiological activity is higher at the soil surface than in the top 20 cm soil layer and the weather in some experiments, such as those in Italy, was probably too dry for antagonistic biota to flourish on crop debris and thus to control eyespot [1].
- ii) Action by escape consists of shifting periods of highest crop susceptibility away from the main periods of pathogen contamination. This is achieved by altering the wheat sowing date. In the case of eyespot, “escape strategies” cannot really be considered. However, early sowing increases the probability of autumn contamination through primary infection, due to the longer time available for eyespot to develop and to affect stems [42].
- iii) During the crop cycle, some cropping practices can mitigate infection through crop status by increasing crop competitiveness and/or by creating less favourable conditions for pest development. Low plant density can limit pathogen development through several mechanisms, such

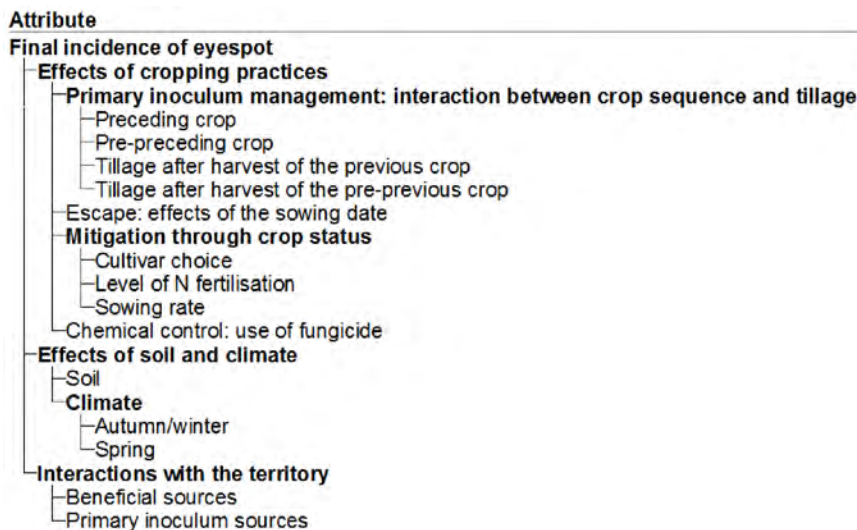


Figure 1. Hierarchical structure of IPSIM-Wheat-Eyespot (screenshot of the DEXi software). Bolded and non-bold terms represent aggregated and basic attributes, respectively. doi:10.1371/journal.pone.0075829.g001

Attribute	Scale
Final incidence of eyespot	80-100 %; 60-80 %; 40-60 %; 20-40 %; 0-20 %
Effects of cropping practices	Favourable; Moderately favourable; Unfavourable
Primary inoculum management: interaction between crop sequence and tillage	Favourable; Moderately favourable; Unfavourable
- Preceding crop	Host; Risk amplifying non-host; Non host
- Pre-preceding crop	Host; Risk amplifying non-host; Non host
- Tillage after harvest of the previous crop	Non-inversion tillage; Inversion tillage
- Tillage after harvest of the pre-previous crop	Non-inversion tillage; Inversion tillage
Escape: effects of the sowing date	Early sowing; Normal sowing date; Late sowing
Mitigation through crop status	Favourable; Moderately favourable; Unfavourable
- Cultivar choice	Very susceptible to susceptible; Quite to very resistant
- Level of N fertilisation	Excess level; Balanced level
- Sowing rate	High; Normal; Low
Chemical control: use of fungicide	None; One
Effects of soil and climate	Very favourable; Favourable; Unfavourable
- Soil	Favourable; Neutral
- Climate	Very favourable; Favourable; Unfavourable
- Autumn/winter	Very favourable; Favourable; Unfavourable
- Spring	Very favourable; Favourable; Unfavourable
Interactions with the territory	Favourable; Neutral
- Beneficial sources	Normal; Important
- Primary inoculum sources	Important; Normal

Figure 2. Attribute scales of IPSIM-Wheat-Eyespot (screenshot of the DEXi software). All the scales are ordered from values detrimental to the crop (i.e. favourable to eyespot) on the left-hand side to values beneficial to the crop on the right-hand side (i.e. unfavourable to eyespot). In the DEXi software, this difference is clearly visible because, by convention, values beneficial to the user are coloured in green, detrimental in red, and neutral in black.

doi:10.1371/journal.pone.0075829.g002

as restricting the contact between plant organs and infectious propagules and lowering the humidity within the canopy. This results in a control of soil-borne diseases like eyespot by low plant density and/or a high shoot number per plant [20]. In addition, low densities increase distances between plants, which limits secondary pathogen cycles, and leads to a drier microclimate. Excessive use of nitrogen fertilisers produces lush crops and favours eyespot through direct and indirect effects [56,57]. However, in the case of eyespot, nitrogen availability in the soil seems to be a minor factor for the development of the disease [10,20,29].

Use of disease-resistant cultivars provides an economic, environmentally friendly and effective strategy to control disease. However, not all resistant cultivars have been assessed in integrated cropping systems [58] and cultivars do not share the same susceptibilities to different diseases [59]. Eyespot resistance is generally not complete and its expression depends widely on environmental factors [22].

- iv) Lastly, a fall-back solution (use of fungicide) can be used when alternative practices are not sufficient. However, several studies have provided evidence for reduced susceptibility to fungicides in populations of *O. yallundae* and *O. acufomis* [60]. For the sake of simplicity, resistance to fungicide in pathogen populations was not taken into account in IPSIM-Wheat-Eyespot.

The two other sub-trees describe the biological environment of the considered field, as well as soil and climate. These sub-trees are not affected by cropping practices. Among these factors, climate is the main factor affecting eyespot development [9,43].

3. Definition of the Attribute Scales. The second step in the design of a DEXi model is the choice of ordinal or nominal scales for basic and aggregated indicators. Sets of discrete values were defined for all attributes of the model and described by symbolic value scales defined by words. These values were defined according to the knowledge available in the international literature and some expertise when needed. IPSIM-Wheat-Eyespot uses at most a three-grade value scale (i.e. “Unfavourable”, “Favourable”, “Very favourable”) for the aggregated and basic attributes.

This scale refers to the disease. The value “Favourable” means that the attribute is favourable to the development of the disease and therefore potentially detrimental to the crop.

Some values for basic indicators can be specified using quantitative values that are then translated into qualitative values. For instance, the translation into qualitative values of the sowing date, sowing density or N rate is performed using experimental references or expertise. This translation takes into account the regional context. For example, a sowing date classified as “Early” in the south of France might be classified as “Normal” in northern France. This classification actually depends on the sowing date distribution in the considered region.

Other attributes are directly qualitatively estimated. For instance, the indicators “inversion tillage or non-inversion tillage” or “preceding and pre-preceding crop” are nominal variables and directly monitored as such in experiments [61,62]. The level of cultivar resistance has been described using the official list provided by the French National Seed Station (Groupe d’Etude et de contrôle des Variétés et des Semences; <http://cat.geves.info/Page/ListeNationale>; accessed November 2012) and published by Arvalis-Institut du végétal (http://www.arvalisinfos.fr/_plugins/WMS_BO_Gallery/page/getElementStream.html?id=13504&prop=file; accessed November 2012). In this list, cultivars are rated for their susceptibility to eyespot on a 0–9 scale, from very susceptible to resistant.

For the climate attribute, a three-value scale (“Unfavourable”; “Favourable”; “Very favourable”) was defined using climatic models [27,43] and data from the INRA Climatik database.

All the scales in Figure 2 are ordered from values detrimental to the crop (i.e. favourable to the disease) on the left-hand side to values beneficial to the crop on the right-hand side (i.e. unfavourable to the disease). In the DEXi software, this difference is clearly visible because, by convention, values beneficial to the user are coloured in green, detrimental in red, and neutral in black. The scales for the “tillage after preceding crop” and “tillage after pre-preceding crop” attributes appear in black since their effects on the disease cannot be defined independently from the crop sequence.

Initial input attribute values (either quantitative or qualitative) are translated into qualitative appreciation, according to two to

three scales defined on the basis of available information in the literature, models or expertise. Sometimes, a two-value scale is enough to represent the value of an indicator (e.g. chemical control was applied or not; or the soil has either been ploughed or not after the preceding harvest). However, other attributes usually need a three-value scale to describe the diversity of cropping practices or environment (e.g. the sowing rate attribute requires three grades to describe farmers’ practices: the sowing rate can be low, normal or high).

4. Definition of Aggregating Tables. The third step in the design of a DEXi model is the choice of aggregating tables determining the aggregation of attributes in the tree and their interactions. For each aggregated attribute in the model, a set of “if-then” rules define the value of the considered attribute as a function of the values of its immediate descendants in the model. The rules that correspond to a single aggregated attribute are gathered together and conveniently represented in tabular form. In this way, each table defines a mapping of all value combinations of lower-level attributes into the values of the aggregate attribute. Figure 3 shows decision rules that correspond to the “mitigation through crop status” aggregated attribute and define the value of this attribute for the 18 possible combinations of the three cultivar choices, the 2 levels of fertilisation and the 3 sowing densities. For example, if the cultivar is quite resistant, the level of N fertilisation balanced and the sowing rate low, then the “mitigation through crop status” attribute will be unfavourable to eyespot (the final incidence will decrease). However, even if the sowing rate and the N application rate are both high, the “mitigation through crop status” attribute during wheat growth will control eyespot significantly because the “cultivar choice” attribute is much more influential than the two other attributes (Figure 3).

The aggregating tables of IPSIM-Wheat-Eyespot have been established using knowledge available in the international literature and summarised in Table 1, and expert knowledge when

needed. All aggregating tables of the model are presented in figures S1, S2, S3, S4, S5, S6.

5. Attribute Weights. The influence of each basic and aggregated attribute on the value of the output variable can be characterised with weights. The higher the weight, the more important the attribute. Table 2 summarises the weights of each of the 19 attributes of the model, providing an overview of the model’s structure. IPSIM-Wheat Eyespot has 3 levels of aggregation (Figure 1), the third one being the leaves (i.e. the model input basic attributes). The “local” and “global” weights are normalised in two different ways. “Local” weights are given to each aggregated attribute separately so that the sum of weights of its immediate descendants in the hierarchy equals 100%. The “global” weights are calculated at a given level of aggregation and express the influence of each attribute at that aggregation level. They are obtained by multiplying the local weight of a given attribute at a given level of aggregation, by local weighting of its ascendants. For instance, the value of the “soil and climate” attribute is completely defined by the “Climate” attribute (100%, local weight), but this attribute only contributes 53% to the definition of the value of “Eyespot incidence” (global weight at the second level of aggregation). Local and global weights are identical at the first level of aggregation, since in this case there is only one level of aggregation. Global weights of basic attributes are shown in bold in Table 2 in order to ease their identification, since they are distributed among the second and third levels of aggregation of IPSIM-Wheat-Eyespot. The sum of global weights at the third level is only 76%. This is because some basic attributes are directly embedded in the model at the second level of aggregation. The sum of global basic attribute weights is logically equal to 100%. Table 2 can be seen as an equivalent of a sensitivity analysis that would aim at identifying the most influential input (and state) variables of a quantitative model.

6. Simulations with DEXi. The qualitative final attribute value (final incidence of eyespot) is calculated by DEXi. The

	Cultivar choice	Level of N fertilisation	Sowing rate	Mitigation through crop status
1	Very susceptible to susceptible	Excess level	High	Favourable
2	Very susceptible to susceptible	Excess level	Normal	Favourable
3	Very susceptible to susceptible	Excess level	Low	Favourable
4	Very susceptible to susceptible	Balanced level	High	Favourable
5	Very susceptible to susceptible	Balanced level	Normal	Favourable
6	Very susceptible to susceptible	Balanced level	Low	Favourable
7	Moderately susceptible	Excess level	High	Moderately favourable
8	Moderately susceptible	Excess level	Normal	Moderately favourable
9	Moderately susceptible	Excess level	Low	Moderately favourable
10	Moderately susceptible	Balanced level	High	Moderately favourable
11	Moderately susceptible	Balanced level	Normal	Moderately favourable
12	Moderately susceptible	Balanced level	Low	Moderately favourable
13	Quite to very resistant	Excess level	High	Unfavourable
14	Quite to very resistant	Excess level	Normal	Unfavourable
15	Quite to very resistant	Excess level	Low	Unfavourable
16	Quite to very resistant	Balanced level	High	Unfavourable
17	Quite to very resistant	Balanced level	Normal	Unfavourable
18	Quite to very resistant	Balanced level	Low	Unfavourable

Figure 3. Aggregating table for the “Mitigation through crop status” aggregated attribute (screenshot of the DEXi software). Aggregation rules for the 18 possible combinations of the 3 cultivar choices, the 2 levels of fertilisation and the 3 sowing rates. doi:10.1371/journal.pone.0075829.g003

Table 1. Available knowledge in the scientific literature describing the effects of cropping practices and the production situation on the incidence of eyespot on wheat.

Factor	Direction of the effect	Intensity of the effect	Impact on eyespot development	References
Tillage	+/-	++	Contradictory results. For some authors, reduced soil tillage decreased eyespot infection. For others, eyespot was often more severe after ploughing than after non-inversion tillage.	[1,11,41,42,44–55]
Preceding and pre-preceding crop	+	++	Preceding and pre-preceding host crops are known to favour eyespot. However, the interaction between tillage and the crop sequence has to be taken into account.	[9,10,29,41–42,55,61,62]
Sowing date	+	++	Eyespot has always been reported to be more severe in early sown crops.	[10,20,27,29,42,55]
N fertilisation rate	+	+	High nitrogen availability generally favoured the disease. However these results were questioned.	[9,10,20,29,56,57]
Sowing rate	+	+	Prevalence was increased by high plant density and/or low shoot number per plant.	[20,29]
Cultivar choice	+	+++	The use of varieties with resistance could obviate the need for fungicide.	[10,21,22,42,58,59]
Cultivar mixture	0	0	No significant difference was found between the disease level in mixtures and the mean of disease level of the mixture components in pure stands.	[70–72]
Climate	+	++	Eyespot strongly depends on climate. Infections require periods of at least 15 h with T° between 4°C and 13°C and HR>80% (from October to April).	[9,27,28,29,43]

Cropping practices and climate can be favourable (+), unfavourable (–) or neutral (0) to the development of eyespot. The intensity of the considered factor is summarised with 4 classes: 0, no effect; +, slight; ++, significant; +++, crucial.
doi:10.1371/journal.pone.0075829.t001

calculation consists in computing all aggregated attribute values according to: (i) the structure of the tree; (ii) a set of input variables (basic attribute values) defining a simulation unit; and (iii) the aggregating tables for the aggregation of attributes. An example of

output results obtained for two simulation units is provided in Figure 4 (input basic attributes and calculated aggregated attribute values for the simulation of two systems: an organic and a high-input one).

Table 2. Respective weights of the attributes of IPSIM-Wheat-eyespot.

Attributes defining the final incidence of eyespot	Local level 1	Local level 2	Local level 3	Global level 1	Global level 2	Global level 3
1 Effects of cropping practices	47			47		
1.1 Primary inoculum management		21			10	
1.1.1 Preceding crop			40			4
1.1.2 Pre-preceding crop			12			1
1.1.3 Tillage after the preceding crop			40			4
1.1.4 Tillage after pre-preceding crop			8			1
1.2 Escape: effects of sowing date		9			4	
1.3 Mitigation through crop status		26			12	
1.3.1 Cultivar choice			100			12
1.3.2 Level of N fertilisation			0			0
1.3.3 Sowing rate			0			0
1.4 Chemical control		44			21	
2 Effects of soil and climate	53			53		
2.1 Soil		0			0	
2.2 Climate		100			53	
2.2.1 Autumn/winter			29			15
2.2.2 Spring			71			38
3 Interactions with the rest of the territory	0			0		

The “local” and “global” weights are calculated for each aggregated attribute separately and are distributed in 3 levels of aggregation. Bold and non-bold terms represent basic attributes and aggregated terms, respectively.
doi:10.1371/journal.pone.0075829.t002

Option	Organic system	High input system
Final incidence of eyespot	20-40 %	60-80 %
Effects of cropping practices	Unfavourable	Moderately favourable
Primary inoculum management: interaction between crop sequence and tillage	Unfavourable	Favourable
Preceding crop	Non host	Host
Pre-preceding crop	Non host	Host
Tillage after harvest of the previous crop	Inversion tillage	Non-inversion tillage
Tillage after harvest of the pre-previous crop	Inversion tillage	Non-inversion tillage
Escape: effects of the sowing date	Late sowing	Early sowing
Mitigation through crop status	Unfavourable	Favourable
Cultivar choice	Quite to very resistant	Very susceptible to susceptible
Level of N fertilisation	Balanced level	Balanced level
Sowing rate	High	Normal
Chemical control: use of fungicide	None	One
Effects of soil and climate	Very favourable	Very favourable
Soil	Favourable	Favourable
Climate	Very favourable	Very favourable
Autumn/winter	Very favourable	Very favourable
Spring	Very favourable	Very favourable
Interactions with the territory	Neutral	Neutral
Beneficial sources	Normal	Normal
Primary inoculum sources	Normal	Normal

Figure 4. Example of 2 simulations carried out with IPSIM-Wheat-Eyespot (screenshot of the DEXi software).
doi:10.1371/journal.pone.0075829.g004

Evaluation of the Predictive Quality of IPSIM-Wheat-Eyespot

1. Description of the Dataset Used. Data representative of a wide range of climate patterns, soils and cropping practices are needed to assess the predictive quality of the model. A large dataset was therefore developed to assess the predictive quality of IPSIM-Wheat-Eyespot. A national survey was conducted to identify relevant data from various research and development institutes. The required datasets had to provide information for input attributes of IPSIM-Wheat-Eyespot (description of cropping practices, soil and climate) and its output (eyespot incidence at the “milky grain”, stage 7: development of fruit on BBCH scale [39]). The dataset obtained is summarised in Table 3. It comprises results from multifactorial trials from 1980 to 1994 in 7 contrasting regions in France, which were set up to analyse the effects of various cropping practices on foot and root winter wheat diseases on different soils and with differing climate patterns. Various cultivars were combined with different crop sequences, conventional and reduced tillage, low or high plant densities, early or late sowing dates, low or high N fertilisation, in various areas of production where eyespot epidemics are observed. Most of these trials were specific studies on foot diseases [20,41,61,62], so the experimental conditions were suited to ensure the presence of eyespot (i.e. infected wheat present in the crop sequence and only susceptible cultivars). Other data originated from a regional agronomic diagnosis [63] performed in cereal fields from 1987 to 1994 in 19 French regions to analyse the effects of cultural practices on the incidence and severity of foot and root disease complexes [64]. In this survey, data were collected on 894 cereal fields in a wide range of production situations.

For some situations, the pre-preceding crop (3 possible types of crop in the model: “host”, “non-host” and “risk amplifying”) and the associated tillage after the harvest of this crop (2 possible values

in the model) were not observed. Instead of ignoring these precious data, simulations were performed for the 3*2 possibilities and only cases for which the 6 simulations led to similar output values were kept for evaluating the model. In all, 526 site-years were used for the evaluation of the model and they represented a large number of combinations of cropping practices and production situations (19 French regions over 9 years).

The data presented in Table 3 were transformed into qualitative values and used as input basic attributes to feed IPSIM-Wheat-Eyespot.

2. Evaluation of the Predictive Quality of IPSIM-Wheat-Eyespot. The evaluation consisted in comparing simulated and observed values. Since the model predicts classes of incidence, observed incidences at wheat stage 7 were transformed into observed incidence classes using the same discretisation as the model (i.e. 0–20%, 20–40%, 40–60%, 60–80%, 80–100%). However, one might want to predict incidences rather than classes of incidence. In order to test the predictive quality of IPSIM-Wheat-Eyespot for incidences, its output main variable was transformed into a numerical value by replacing the predicted incidence class by the centre of the class. The model was therefore evaluated in two ways: first, on its ability to predict incidence classes, and second on its ability to predict eyespot incidences.

For incidence classes, the deviation of the model was characterised by calculating the number of classes of difference between observed and simulated classes. The distribution of simulated classes was displayed according to observed incidence classes. This information was summarised by a multinomial distribution in 9 difference classes (from –4 to +4) since the model has 5 incidence classes. The proportion of situations for which the model correctly predicted the observed incidence class was taken as an indicator of the quality of prediction of the model. In addition, a non-parametric Wilcoxon test was performed to test

Table 3. Main features of the datasets used for the evaluation of IPSIM-Wheat-Eyespot’s predictive quality.

Cropping practice	Design	Year	Location	Number of site-years	References
Crop sequence	Multifactorial field trials	1981–1982	Toulouse (Midi-Pyrénées)	11	[61]
Crop sequence including various durations of continuous cereal cropping	Multifactorial field trials	1980–1994	Grignon (Ile-de-France)	29	[62]
Tillage (soil structure)	Multifactorial field trials	1992–1993	Péronne (Picardie)	8	[73]
Tillage (crop residue vertical distribution)	Multifactorial field trials	1992–1993	Chartres (Centre), Grignon (Ile-de-France)	12	[41]
Sowing date, sowing rate, N fertilisation	Multifactorial field trials	1992–1994	Chartres, La Verrière (Ile-de-France), Le Rheu (Bretagne), Nancy (Lorraine), Dijon (Bourgogne)	95	[20]
Tillage, previous crop, fertilisation, sowing rate, sowing date, cultivar choice and use of fungicide	Diagnoses in cereal fields	1987–1994	19 French regions	370	[64]
Crop sequence	Multifactorial field trials	1981–1982	Toulouse (Midi-Pyrénées)	11	[61]
Crop sequence including various durations of continuous cereal cropping	Multifactorial field trials	1980–1994	Grignon (Ile-de-France)	29	[62]
Tillage (soil structure)	Multifactorial field trials	1992–1993	Péronne (Picardie)	8	[73]
Tillage (crop residue vertical distribution)	Multifactorial field trials	1992–1993	Chartres (Centre), Grignon (Ile-de-France)	12	[41]
Sowing date, sowing rate, N fertilisation	Multifactorial field trials	1992–1994	Chartres, La Verrière (Ile-de-France), Le Rheu (Bretagne), Nancy (Lorraine), Dijon (Bourgogne)	95	[20]
Tillage, previous crop, fertilisation, sowing rate, sowing date, cultivar choice and use of fungicide	Diagnoses in cereal fields	1987–1994	19 French regions	370	[64]

doi:10.1371/journal.pone.0075829.t003

whether the distribution of errors was zero-centred (in that case, the model can be considered unbiased).

For incidences, the predictive quality of IPSIM-Wheat-Eyespot was characterised using three common statistical criteria [65]: bias (Equation 1), Root Mean Square Error of Prediction (RMSEP, Equation 2), and efficiency (Equation 3).

$$Bias = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^{i=n} (Y_i^{obs} - Y_i^{sim}) \tag{1}$$

where n is the total number of considered situations, Y_i^{obs} the observed value for situation i , and Y_i^{sim} is the corresponding value simulated by the model. The bias measures the average difference between observed and simulated values. If the model underestimates the considered variable, the bias is positive. Conversely, if the model overestimates the variable, the bias is negative.

$$RMSEP = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^{i=n} (Y_i^{obs} - Y_i^{sim})^2} \tag{2}$$

RMSEP quantifies the prediction error when the model parameters have not been estimated using the observations Y_i^{obs} used in the calculation of this criterion.

$$EF = 1 - \frac{\sum_{i=1}^{i=n} (Y_i^{obs} - Y_i^{sim})^2}{\sum_{i=1}^{i=n} (Y_i^{obs} - \bar{Y})^2} \tag{3}$$

Where \bar{Y} is the mean of observed data. Nash and Sutcliffe [66] defined the efficiency as a normalised statistic that determines the relative magnitude of the residual variance (“noise”) compared with the measured data variance (“information”). The efficiency defines the ability of a model to predict the value of a variable. The efficiency can range from $-\infty$ to 1. If the model perfectly predicts the observations, the efficiency is maximum and is equal to 1. Efficiency values lower than 0 indicate that the mean observed value is a better predictor than the simulated values, which indicate a poor predictive quality of the model. Values between 0 and 1 are generally viewed as acceptable levels of performance. The closer the model efficiency is to 1, the better is the fit between observed and simulated data [65].

Results

Evaluation of the Quality of Prediction for Final Incidence Classes

The high number of observed site-years in the dataset (526) permitted a reliable evaluation of the predictive quality of IPSIM-Wheat-Eyespot. Residuals were distributed around 0 (Figure 5), indicating that the predicted values were close to observations. Nearly half (47.1%) of the simulated classes encompassed the observed values and 80.4% had at most a difference of one class only. In addition, there are nearly as many negative as positive differences of exactly one class. The Wilcoxon test performed over the 9 class differences (from -4 to $+4$) proved that the model was significantly biased (simulated final incidence classes lower than observations, $p < 1.0 \cdot 10^{-10}$). Figure 6 illustrates the distribution of class differences between observed and predicted final eyespot incidences. The overall predictive quality of IPSIM-Wheat-Eyespot was judged fair, even if slightly biased. The predictive

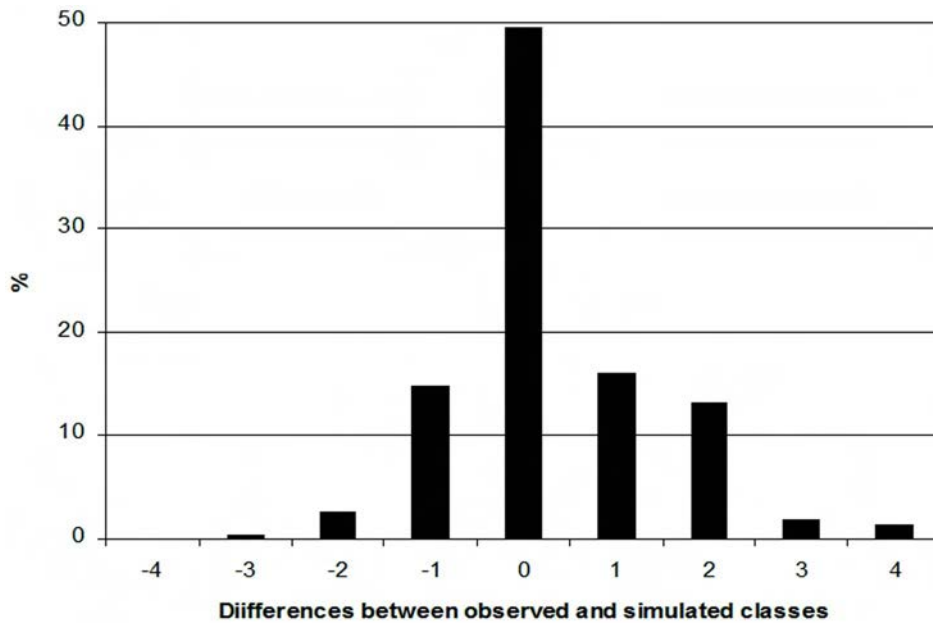


Figure 5. Evaluation of the predictive quality of IPSIM-Wheat-Eyespot. Residuals distribution: number of classes of difference between observed and simulated final eyespot classes (0–20%, 20–40%, 40–60%, 60–80%, 80–100%; 526 fields, over 9 years and 19 French regions). doi:10.1371/journal.pone.0075829.g005

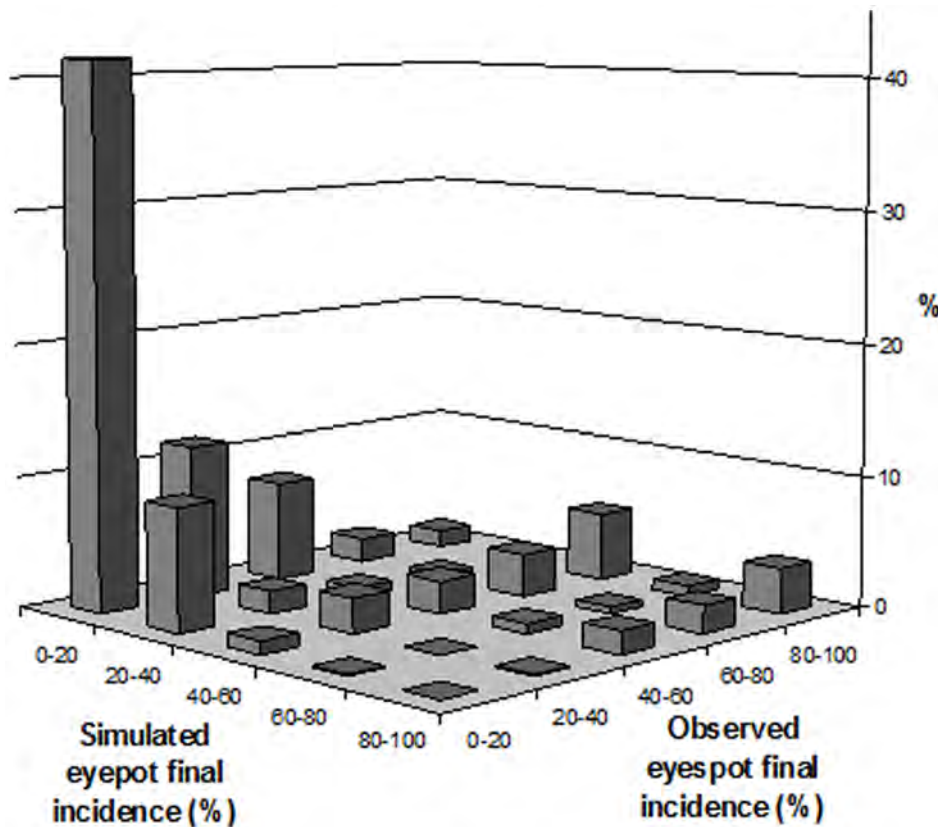


Figure 6. Evaluation of the predictive quality of IPSIM-Wheat-Eyespot Distribution of class differences between observed and predicted final eyespot incidences. (526 fields, over 9 years and 19 French regions). doi:10.1371/journal.pone.0075829.g006

quality was good for the lowest class (52% of all the observations in the dataset): 80% of the observed values between 0 and 20% were correctly simulated. The model underestimated final incidences for observations higher than 20%.

Evaluation of the Quality of Prediction for Final Incidence Values

For these 526 output values, the overall predictive quality of the model was correct. The model's predictive quality was good as its efficiency value was correct: 0.51. The Root Mean Square Error of Prediction error was quite high, 24%. The bias was positive (5.0%), so the model slightly underestimated final eyespot incidences.

Discussion

Interests and Limitations of IPSIM-Wheat-Eyespot

Several studies have been conducted to analyse the effects of cropping practices on the development of eyespot on wheat [10,29]. However, only one statistical model had been developed in order to predict the incidence of eyespot as a function of few cropping practices [29]. IPSIM-Wheat-Eyespot offers new possibilities for the design of innovative cropping systems since it is the first functional model to encompass simultaneously the effects of soil, climate and the cropping system and to represent the effects of interactions among these many factors.

The development of IPSIM-Wheat-Eyespot was made possible using (1) a schematic representation of the relationships between cropping practices, the production situation and injuries, (2) the translation of this conceptual scheme into a simulation model, and (3) a combination of data from a wide range of production situations (many regions and years) to test its predictive quality.

1. Conceptual Bases of IPSIM-Wheat-Eyespot. The conceptual scheme of IPSIM-Wheat-Eyespot is innovative because i) it encompasses a temporal scale longer than the cropping season (effect of the crop sequence in interaction with tillage over two years); ii) the main cropping practices that can affect the disease are represented; iii) interactions between practices as well as interactions between practices and climate are taken into account. As compared to the conceptual scheme of IPSIM [33], the spatial scale considered was limited to the field because of the lack of interactions at larger scales. In addition, the conceptual scheme of IPSIM-Wheat-Eyespot does not take into account socio-economic drivers, farmer's goals and cognition since it does not aim at simulating decisions. However, this original conceptual model can help design innovative cropping systems less susceptible to eyespot. The information provided by IPSIM-Wheat-Eyespot should be combined with other sources of information (references, other models, or expertise) in order to design new cropping systems, especially since damage (*i.e.* crop loss) caused by the disease are not represented.

2. Hierarchical Tree of Attributes and Aggregating Tables. The qualitative nature of the DEX method is well suited to the modelling of complex systems for which no high level of precision is required. The DEXi software tool [36] offered a suitable environment for the organisation of available knowledge and a rapid development of IPSIM-Wheat-Eyespot. The main breakthrough of the IPSIM platform is to allow the handling of complexity in a simple way [33]. The work presented in this paper provides a proof of concept for this innovative modelling approach in the field of crop protection for a single disease. A major innovation of this modelling approach is to be able to aggregate attributes of different natures (e.g. cultivar choice, a nominal variable and fertilisation rate, a quantitative variable) to describe

the impact of various components of cropping systems and their interactions on eyespot incidence. IPSIM-Wheat-Eyespot is actually the first model which can overcome the lack of data on the relationships between cropping practices and a single pest in a given production situation to help design strategies to control the disease. The qualitative DEXi approach may lead to a loss of precision and sensitivity in the developed model [67]. Increasing the number of attribute scales at the top of the decision tree could be a way to improve the sensitivity [68]. However, it results in more complicated aggregating tables which are consequently more difficult to define. Due to the tremendous complexity of interactions between cropping practices and the production situation, a smaller number of indicator states have been chosen to keep the representation of the complex underlying mechanisms as simple as possible. A correct definition of aggregating tables is of primary importance in DEXi models [68]. The choice of the nature and the number of qualitative scales is also crucial and will partly determine the quality of prediction. The choices of both aggregating tables and qualitative scales of attributes have to be explicit and traceable. Indeed, the scales and the aggregating tables used for the attributes of IPSIM-Wheat-Eyespot could not be determined in a generic way but have been specifically defined according to experimental results, models available in the literature and expert knowledge if need be. Unfortunately, literature to analyse some attributes may not exist, lack certain features, or controversial. For instance, the impact of soil type on eyespot incidence is very poorly described in the international literature and the relationships between tillage and eyespot are subject to much controversy [43]. For these cases, expert knowledge had to be used to complete some aggregating tables. In addition, the model runs using simple "if-then" rules, which are "shallow" in the sense that they only define direct relationships between conditions and consequences, but do not represent any "deeper" (or mechanistic) biological, physical, chemical processes [69]. Since the early stages of development of IPSIM-Wheat-Eyespot, it has been clear that precision was not an objective of the model. It appears more important to focus on accuracy rather than precision when modelling such a complex system.

Table 2 reveals the overall behaviour of IPSIM-Wheat-Eyespot. This is also an additional value of the IPSIM approach: the model is transparent and can be easily discussed. For instance, it is clear that the overall effect of fungicide on the disease is low (21%). This is because fungicide does not always control the disease efficiently [59]. The main factor influencing the disease is the spring weather (38%). This is consistent with Matusinsky et al. [43] who showed that the disease was very dependent on the climatic conditions during spring.

3. Predictive Quality of IPSIM-Wheat-Eyespot. The quality of the analysis of the IPSIM-Wheat-Eyespot predictive quality not only depends on the model itself (hierarchical structure of attributes and aggregating tables) but also on the diversity of the data used, which must reflect a wide range of production situations. These data should represent a variety of soil, climate and cropping practices, but also of final incidences. The dataset used in this study satisfied the three former conditions, but did not fully satisfy the latter. The observed final eyespot incidences were generally quite low, so the predictive quality of IPSIM-Wheat-Eyespot could not be extensively evaluated for high levels of incidence.

The main difference with other models is that IPSIM-Wheat-Eyespot is based on qualitative variables and not quantitative ones. The use of qualitative data requires greater attention to the description of the adopted hypotheses, because qualitative data are more difficult to interpret objectively [68]. This is particularly the

case for the transformation of quantitative variables that have to be translated into qualitative input of IPSIM-Wheat-Eyespot (e.g. sowing density expressed in kg/ha or number of seeds m^{-2} and translated into “low”, “normal” or “high”). Thus, IPSIM-Wheat-Eyespot can be used in 2 ways. On the one hand, some users can provide directly qualitative basic attributes (i.e. input variables of the model) if they want to test the performance of some technical options in given production situation. On the other hand, other users might want to run the model for real or putative situations where both the production situation and cropping practices are characterised with quantitative, qualitative or nominative data. In this case, an algorithm should be developed in order to rigorously translate these data into appropriate basic attributes based on national or international official references (e.g. a given cultivar will be classified as “very susceptible to susceptible”; “moderately susceptible”; or “resistant” according to official national or international seed classification); regional references (e.g. a given sowing date will be classified as “early”; “normal”; “late” as a function of regional references established by extension services); knowledge available in the literature (e.g. a given crop will be classified as “host”, “non-host”, or “risk-amplifying crop” according to published scientific articles); references produced by models (e.g. a given weather scenario can be classified as “very favourable”; “favourable”; or “unfavourable” according to a published model).

IPSIM-Wheat-Eyespot proved to fairly represent the variability of the 526 “site-years” used to test its predictive quality. This indicates that the model is already operational and can represent the effects of a wide range of production situations*cropping practices combinations for eyespot epidemics to help design cropping systems less susceptible to the disease. This is remarkable since, unlike most models, no fitting procedure was used.

Prospects

1. Improvements to the Model. Further refinements could be added in the future. They should keep the balance between: i) modelling of the effects of cropping practices and the production situation on eyespot epidemics as accurately as possible, and ii) keeping the model as simple as possible. In addition to the design of a model, the approach presented in this article allowed us to structure the available knowledge in the literature about the effects of cropping practices and the production situation on eyespot epidemics (Table 1). Aggregating tables derived from Table 1 could be easily adapted according to future advances in the knowledge of underlying mechanisms responsible for the disease. In the same way, the model structure could easily be modified to integrate new knowledge. For instance, the model does not yet take into account the effects of cultivar mixtures, whereas some authors have described a reduction of eyespot by cultivar mixtures [70–72]. However, this cropping practices is not currently widespread, data are sparse and there is no consensus in the literature on this matter.

IPSIM-Wheat-Eyespot requires the provision of qualitative basic attributes. This is a benefit for the *ex-ante* design of innovative cropping systems. However, this requires translating nominative or quantitative variables used to describe cropping practices and the production situation into *ad hoc* qualitative variables. In order to avoid subjectivity when translating these variables, some reference values have to be used. Such values were gathered for several French regions (data not shown) in order to design an algorithm that translates nominative or quantitative variables describing cropping practices and the production situation into relevant basic attributes of the model. This algorithm can be easily adapted to any location where wheat is grown and eyespot is present,

provided that relevant reference values are available. At last, aggregating tables could be adjusted to improve IPSIM-Wheat-Eyespot’s predictive quality using statistical procedures, as done for parameter estimation for quantitative models.

2. Future Use of the Model. The main breakthrough of the IPSIM framework, with a simple hierarchical aggregative structure, is to allow the handling of complexity in a simple way. The input variables of models developed with IPSIM, such as IPSIM-Wheat-Eyespot, are easily obtained [33]. IPSIM-Wheat-Eyespot will help design cropping systems with a lower risk of eyespot on wheat. In order to do so, simulation plans will be defined to assess the performance of cropping practices in a given production situation with regard to the control of the disease. It is obvious that this simulation work will have to be combined with other sources of information such as other models, expert knowledge, diagnoses in commercial fields or experiments to propose innovative sustainable cropping systems.

The model, along with the interface that translates nominative and quantitative variables into relevant qualitative input variables for IPSIM-Wheat-Eyespot (Microsoft® Office Excel 2003), is now available upon request. This model can now be used as a communication, organisation, training and teaching tool for researchers, extension engineers, advisers, teachers or even farmers. Appropriation and adaptation of the model by technicians, advisers or farmers could be useful to exchange knowledge and experience (building up from their technical know-how).

The model presented in this paper only takes into account one pest among the biocenosis of a wheat field. Nevertheless, it is necessary to consider the entirety of the major pests when designing cropping systems because farmers have to manage combinations of pest populations, leading to injury profiles, which can in turn lead to quantitative or qualitative damage and ultimately economic losses. In addition to being a model specific to a given disease, IPSIM-Wheat-Eyespot can also be seen as the first sub-model of IPSIM-Wheat, a model that will predict injury profiles on wheat as a function of cropping practices and the production situation.

Supporting Information

Figure S1 Aggregating table used for the calculation of the value of the aggregative attribute “Final incidence of Eyespot” (screenshot of the DEXi software).

(TIF)

Figure S2 Aggregating table used for the calculation of the value of the aggregative attribute “Effects of cropping practices” (screenshot of the DEXi software).

(TIF)

Figure S3 Aggregating table used for the calculation of the value of the aggregative attribute “Effects of soil and climate” (screenshot of the DEXi software).

(TIF)

Figure S4 Aggregating table used for the calculation of the value of the aggregative attribute “Primary inoculum management: interaction between crop sequence and tillage” (screenshot of the DEXi software).

(TIF)

Figure S5 Aggregating table used for the calculation of the value of the aggregative attribute “Mitigation through crop status” (screenshot of the DEXi software).

(TIF)

Figure S6 Aggregating table used for the calculation of the value of the aggregative attribute “Climate” (screenshot of the DEXi software).
(TIF)

Acknowledgments

We thank Alain Cavelier (INRA, Rennes), Xavier Coquil (INRA, Nancy), Claire Thierry (INRA, Nancy), Michel Bertrand (INRA, Versailles-Grignon) for providing data. We also acknowledge Marc Délös (French Ministry of Agriculture), David Gouache (ARVALIS-Institut du Végétal),

Claude Maumené (ARVALIS-Institut du Végétal), Sabrina Gaba (INRA, Dijon), Marie Gosme (INRA, Versailles-Grignon), Robert Faivre (INRA, Toulouse) and Bruno Coulomb (INRA, Toulouse) for their useful advices.

Author Contributions

Conceived and designed the experiments: NC PL FM. Performed the experiments: NC PL FM. Analyzed the data: JNA MHR CC. Contributed reagents/materials/analysis tools: JNA MHR. Wrote the paper: JNA MHR PD NC.

References

- Montanari M, Innocenti G, Toderi G (2006) Effects of cultural management on the foot and root disease complex of durum wheat. *J Plant Pathol* 88: 149–156.
- Lucas JA, Dyer PS, Murray TD (2000) Pathogenicity, host-specificity, and population biology of *Tapesia* spp., causal agents of eyespot disease of cereals. *Advances in Botanical Research Incorporating. Adv Plant Pathol* 33: 225–258.
- Crous PW, Groenewald JZ, Gams W (2003) Eyespot of cereals revisited: ITS phylogeny reveals new species relationships. *Eur J Plant Pathol* 109: 841–850.
- Ray RV, Jenkinson P, Edwards SG (2004) Effects of fungicides on eyespot, caused predominantly by *Oculimacula acuformis*, and yield of early-drilled winter wheat. *Crop Prot* 23: 1199–1207.
- Ray RV, Crook MJ, Jenkinson P, Edwards SG (2006) Effect of eyespot caused by *Oculimacula yallundae* and *O. acuformis*, assessed visually and by competitive PCR, on stem strength associated with lodging resistance and yield of winter wheat. *J Exp Bot* 57: 2249–2257.
- Dyer PS, Nicholson P, Lucas JA, Peberdy JF (1996) *Tapesia acuformis* as a causal agent of eyespot disease of cereals and evidence for a heterothallic mating system using molecular markers. *Mycol Res* 100: 1219–1226.
- Scott PR, Hollins TW (1974) Effects of eyespot on the yield of winter wheat. *Ann App Biol* 78: 269–279.
- Clarkson JDS (1981) Relationship between eyespot severity and yield loss in winter-wheat. *Plant Pathol* 30: 125–131.
- Fitt BDL, Goulds A, Polley RW (1988) Eyespot (*Pseudocercospora herpotrichoides*) epidemiology in relation to prediction of disease severity and yield loss in winter-wheat - a review. *Plant Pathol* 37: 311–328.
- Fitt BDL, Goulds A, Hollins TW, Jones DR (1990) Strategies for control of eyespot (*Pseudocercospora herpotrichoides*) in UK winter wheat and winter barley. *Ann App Biol* 117: 473–486.
- Clarkson JP, Lucas JA (1993) Screening for potential antagonists of *Pseudocercospora herpotrichoides*, the causal agent of eyespot disease of cereals 1. Bacteria. *Plant Pathol* 42: 543–551.
- Russell PE (2005) A century of fungicide evolution. *J Agr Sci* 143: 11–25.
- Leroux P, Gredt M (1997) Evolution of fungicide resistance in the cereal eyespot fungi *Tapesia yallundae* and *Tapesia acuformis* in France. *Pestic Sci* 51: 321–327.
- Leroux P, Gredt M, Albertini C, Walker AS (2006) Characteristics and distribution of strains resistant to fungicides in the wheat eyespot fungi in France. 8ème Conférence Internationale sur les Maladies des Plantes, Tours, France, 5 et 6 Décembre. pp. 574–583.
- Stoate C, Boatman ND, Borralho RJ, Carvalho CR, Snoo GRd, et al. (2001) Ecological impacts of arable intensification in Europe. *J Environ Manage* 63: 337–365.
- Bell EM, Sandler DP, Alavanja MC (2006) High pesticide exposure events among farmers and spouses enrolled in the agricultural health study. *J Agri Saf Health* 12: 101–116.
- Paillotin G (2008). *Ecophyto2018. Chantier 15 «agriculture écologique et productive» Rapport final du Président du Comité opérationnel. Ministère de l'agriculture et de la pêche. Paris, France. 138 pp.* http://agriculture.gouv.fr/IMG/pdf/Rapport_Paillotin_.pdf. Accessed November 2012.
- Epstein L, Bassein S (2003) Patterns of pesticide use in California and the implications for strategies for reduction of pesticides. *Annu Rev Phytopathol* 41: 351–375.
- Birch ANE, Begg GS, Squire GR (2011) How agro-ecological research helps to address food security issues under new IPM and pesticide reduction policies for global crop production systems. *J Exp Bot* 62: 3251–3261.
- Colbach N, Saur L (1998) Influence of crop management on eyespot development and infection cycles of winter wheat. *Eur J Plant Pathol* 104: 37–48.
- Doussinault G, Delibes A, Sanchez-Monge R, Garcia-Olmedo F (1983) Transfer of a dominant gene for resistance to eyespot disease from a wild grass to hexaploid wheat. *Nature* 303: 698–700. United Kingdom.
- Wei L, Muranty H, Zhang H (2011) Advances and prospects in wheat eyespot research: contributions from genetics and molecular tools. *J Phytopathol* 159: 457–470.
- Murray TD, Delapena RC, Yildirim A, Jones SS (1994) A new source of resistance to *Pseudocercospora-herpotrichoides*, cause of eyespot disease of wheat, located on chromosome-4v of *Dasyphyrum-villosum*. *Plant Breeding* 113: 281–286.
- Savary S, Mille B, Rolland B, Lucas P (2006) Patterns and management of crop multiple pathosystems. *Eur J Plant Pathol* 115: 123–138.
- Bergez JE, Colbach N, Crespo O, Garcia F, Jeuffroy MH, et al. (2010) Designing crop management systems by simulation. *Eur J Agron* 32: 3–9.
- Aubertot JN, Doré T, Ennaifar S, Ferré F, Fourbet JF et al. (2005) Integrated Crop Management requires to better take into account cropping systems in epidemiological models. *Proceedings of the 9th International Workshop on Plant Disease Epidemiology*. 11–15 April. Landerneau, France.
- Payen D, Rapilly F, Galliot M (1979) Effect of the sowing date on the climatic potentialities of winter infections of soft winter wheat by eyespot in France. *Comptes Rendus des Séances de l'Académie d'Agriculture de France* 7 : 473–481.
- Délös M (1995) Top: a model forecasting eyespot development. *Phytoma* 474: 26–28.
- Colbach N, Meynard JM, Duby C, Huet P (1999) A dynamic model of the influence of rotation and crop management on the disease development of eyespot. *Proposal of cropping systems with low disease risk. Crop Prot* 18: 451–461.
- Willoquet L, Aubertot JN, Lebard S, Robert C, Lannou C, et al. (2008) Simulating multiple pest damage in varying winter wheat production situations. *Field Crop Res* 107: 12–28.
- Savary S, Willocquet L, Elazegui FA, Teng PS, Pham Van D, et al. (2000) Rice pest constraints in tropical Asia: characterization of injury profiles in relation to production situations. *Plant Dis* 84: 341–337.
- Breman H, de Wit CT (1983) Rangeland Productivity and Exploitation in the Sahel. *Science* 221: 1341–1347.
- Aubertot J-N, Robin M-H (2013) Injury Profile Simulator, a Qualitative Aggregative Modelling Framework to Predict Crop Injury Profile as a Function of Cropping Practices, and the Abiotic and Biotic Environment. *I. Conceptual Bases. PLoS ONE* 8(9): e73202. doi:10.1371/journal.pone.0073202.
- Wiese MV (1987) Compendium of wheat diseases. Second edition. American Phytopathological Society. St Paul, Minnesota, USA. 112 pp.
- Bohanec M (2009) DEXi: program for multi-attribute decision making, Version 3.02. Jozef Stefan Institute, Ljubljana. Available: <http://www.ai.ijs.si/MarkoBohanec/dexi.html>. Accessed November 2012
- Griffiths BS, Ball BC, Daniell TJ, Hallett PD, Neilson R, et al. (2010) Integrating soil quality changes to arable agricultural systems following organic matter addition, or adoption of a ley-arable rotation. *App Soil Ecol* 46: 43–53.
- Bohanec M (2003) Decision support. In: Mladenčić D, Lavrač N, Bohanec M, Moyle S (Eds.). *Data Mining and Decision Support: Integration and Collaboration*, Kluwer Academic Publishers (2003), pp. 23–35.
- Bohanec M, Cortet J, Griffiths B, Znidarsic M, Debeljak M, et al. (2007) A qualitative multi-attribute model for assessing the impact of cropping systems on soil quality. *Pedobiologia* 51: 239–250.
- Lancashire PD, Bleiholder H, Boom Tvd, Langeluddeke P, Stauss R, et al. (1991) A uniform decimal code for growth stages of crops and weeds. *Ann Appl Biol* 119: 561–601.
- Kropff MJ, Teng PS, Rabbinge R (1995) The challenge of linking pest and crop models. *Agricultural Systems* 49: 413–434.
- Colbach N, Meynard JM (1995) Soil tillage and eyespot - influence of crop residue distribution on disease development and infection cycles. *Eur J Plant Pathol* 101: 601–611.
- Meynard JM, Dore T, Lucas P (2003) Agronomic approach: cropping systems and plant diseases. *C R Biol* 326: 37–46.
- Matusinsky P, Mikolasova R, Klem K, Spitzer T (2009) Eyespot infection risks on wheat with respect to climatic conditions and soil management. *J Plant Pathol* 91: 93–101.
- Vanova M, Matusinsky P, Javurek M, Vach M (2011) Effect of soil tillage practices on severity of selected diseases in winter wheat. *Plant Soil Environ* 57: 245–250.
- Jenkyn JF, Gutteridge RJ, Bateman GL, Jalaluddin M (2010) Effects of crop debris and cultivations on the development of eyespot of wheat caused by *Oculimacula* spp. *Ann Appl Biol* 156: 387–399.
- Cox J, Cock IJ (1962) Survival of *Cercospora herpotrichoides* on naturally infected straws of wheat and barley. *Plant Pathol* 11: 65–66.
- Herrman T, Wiese MV (1985) Influence of cultural practices on incidence of foot rot in winter wheat. *Plant Dis* 69: 948–950.

48. Smiley RW, Collins HP, Rasmussen PE (1996) Diseases of wheat in long-term agronomic experiments at Pendleton, Oregon. *Plant Dis* 80: 813–820.
49. Innocenti G, Montanari M, Marengi A, Toderi G (2000) Influence of cropping systems on eyespot in winter cereals. *Ramulispora herpotrichoides* in cereali vernini in diverse situazioni culturali. *Atti, Giornate fitopatologiche*, Perugia, 16–20 aprile, Volume 2: 241–246.
50. Bailey KL, Gossen BD, Lafond GP, Watson PR, Derksen DA (2001) Effect of tillage and crop rotation on root and foliar diseases of wheat and pea in Saskatchewan from 1991 to 1998: univariate and multivariate analyses. *Can J Plant Sci* 81: 789–803.
51. Jenkyn JF, Christian DG, Bacon ETG, Gutteridge RJ, Todd AD (2001) Effects of incorporating different amounts of straw on growth, diseases and yield of consecutive crops of winter wheat grown on contrasting soil types. *J Agr Sci* 136: 1–14.
52. Jalaluddin M, Jenkyn JF (1996) Effects of wheat crop debris on the sporulation and survival of *Pseudocercospora herpotrichoides*. *Plant Pathol* 45: 1052–1064.
53. Anken T, Weisskopf P, Zihlmann U, Forrer H, Jansa J, et al. (2004) Long-term tillage system effects under moist cool conditions in Switzerland. *Soil Till Res* 78: 171–183.
54. Prew RD, Ashby JE, Bacon ETG, Christian DG, Gutteridge RJ, et al. (1995) Effects of incorporating or burning straw, and of different cultivation systems, on winter wheat grown on two soil types, 1985–91. *J Agr Sci* 124: 173–194.
55. Burnett FJ, Hughes G (2004) The development of a risk assessment method to identify wheat crops at risk from eyespot. HGCA Project Report: 87 pp.
56. Agrios GN (2005) *Plant pathology*. Fifth edition. Elsevier Academic Press. San Diego, USA. 948 pp.
57. Datnoff LE, Elmer WH, Huber DM (2007) *Mineral nutrition and plant disease*. American Phytopathological Society Press. St Paul, Minnesota, USA. 278 pp.
58. Loyce C, Meynard JM, Bouchard C, Rolland B, Lonnet P, et al. (2008) Interaction between cultivar and crop management effects on winter wheat diseases, lodging, and yield. *Crop Prot* 27: 1131–1142.
59. Zhang XY, Loyce C, Meynard JM, Savary S (2006) Characterization of multiple disease systems and cultivar susceptibilities for the analysis of yield losses in winter wheat. *Crop Prot* 25: 1013–1023.
60. Parnell S, Gilligan CA, Lucas JA, Bock CH, van den Bosch F (2008) Changes in fungicide sensitivity and relative species abundance in *Oculimacula yallundae* and *O. acuformis* populations (eyespot disease of cereals) in Western Europe. *Plant Pathol* 57: 509–517.
61. Colbach N, Lucas P, Cavelier N (1994) Influence of crop succession on foot and root diseases of wheat. *Agronomie* 14: 525–540.
62. Colbach N, Huet P (1995) Modelling the frequency and severity of root and foot diseases in winter wheat monocultures. *Eur J Agron* 4: 217–227.
63. Dore T, Clermont-Dauphin C, Crozat Y, David C, Jeuffroy MH, et al. (2008) Methodological progress in on-farm regional agronomic diagnosis. A review. *Agron Sustain Dev* 28: 151–161.
64. Cavelier A, Cavelier N, Colas AY, Montfort F, Lucas P (1998) ITITECH: a survey to improve the evaluation of relationships between cultural practices and cereal disease incidence. Brighton Crop Protection Conference: Pests & Diseases. Volume 3: Proceedings of an International Conference, Brighton, UK, 16–19 November. 1023–1028.
65. Wallach D, Makowski D, Jones J (2006). *Working Dynamic Crop Models: Evaluation, Analysis, Parameterization and Application*. Elsevier. 447p.
66. Nash JE, Sutcliffe JV (1970) River flow forecasting through conceptual models part I — A discussion of principles. *J Hydrol* 10: 282–290.
67. Sadok W, Angevin F, Bergez JE, Bockstaller C, Colomb B, et al. (2009) MASC, a qualitative multi-attribute decision model for ex ante assessment of the sustainability of cropping systems. *Agron Sustain Dev* 29: 447–461.
68. Pelzer E, Fortino G, Bockstaller C, Angevin F, Lamine C, et al. (2012) Assessing innovative cropping systems with DEXiPM, a qualitative multi-criteria assessment tool derived from DEXi. *Ecol Indic* 18: 171–182.
69. Bohanec M, Messéan A, Scatasta S, Angevin F, Griffiths B, et al. (2008) A qualitative multi-attribute model for economic and ecological assessment of genetically modified crops. *Ecol Model* 215: 247–261.
70. Vilchmeller V (1992) Mixed cropping of cereals to suppress plant-diseases and omit pesticide applications. *Biol Agric Hort* 8: 299–308.
71. Mundt CC, Brophy LS, Schmitt MS (1995) Choosing crop cultivars and cultivar mixtures under low versus high disease pressure - a case-study with wheat. *Crop Prot* 14: 509–515.
72. Saur L, Mille B (1997) Disease progress of *Pseudocercospora herpotrichoides* in mixed stands of winter wheat cultivars. *Agronomie* 17: 113–118.
73. Colbach N (1995) Modélisation de l'influence des systèmes de culture sur les maladies du pied et des racines du blé tendre d'hiver. Doctorat de l'INA P-G, Paris. 258 p.

Annexe 7. Utility function used for the calculation of the value of the aggregative attribute “Final incidence of Eyespot” (screenshot of the DEXi software).

	Effects of cropping practices	Effects of soil and climate	Interactions with the territory	Final incidence of eyespot
1	Favourable	Very favourable	Favourable	100%
2	Favourable	Very favourable	Neutral	100%
3	Favourable	Favourable	Favourable	80-100 %
4	Favourable	Favourable	Neutral	80-100 %
5	Favourable	Unfavourable	Favourable	0-20 %
6	Favourable	Unfavourable	Neutral	0-20 %
7	Moderately favourable	Very favourable	Favourable	60-80 %
8	Moderately favourable	Very favourable	Neutral	60-80 %
9	Moderately favourable	Favourable	Favourable	40-60 %
10	Moderately favourable	Favourable	Neutral	40-60 %
11	Moderately favourable	Unfavourable	Favourable	0-20 %
12	Moderately favourable	Unfavourable	Neutral	0-20 %
13	Unfavourable	Very favourable	Favourable	20-40 %
14	Unfavourable	Very favourable	Neutral	20-40 %
15	Unfavourable	Favourable	Favourable	0-20 %
16	Unfavourable	Favourable	Neutral	0-20 %
17	Unfavourable	Unfavourable	Favourable	0%
18	Unfavourable	Unfavourable	Neutral	0%

Annexe 8. Utility function used for the calculation of the value of the aggregative attribute “Effects of cropping practices” (screenshot of the DEXi software).

	Primary inoculum management:	Escape: effects of the sowing date	Mitigation through crop status	Chemical control:	Effects of cropping practices
1	Favourable	Early sowing	Favourable	None	Favourable
2	Favourable	Early sowing	Favourable	One	Moderately favourable
3	Favourable	Early sowing	Moderately favourable	None	Moderately favourable
4	Favourable	Early sowing	Moderately favourable	One	Moderately favourable
5	Favourable	Early sowing	Unfavourable	None	Unfavourable
6	Favourable	Early sowing	Unfavourable	One	Unfavourable
7	Favourable	Normal sowing date	Favourable	None	Favourable
8	Favourable	Normal sowing date	Favourable	One	Moderately favourable
9	Favourable	Normal sowing date	Moderately favourable	None	Moderately favourable
10	Favourable	Normal sowing date	Moderately favourable	One	Unfavourable
11	Favourable	Normal sowing date	Unfavourable	None	Unfavourable
12	Favourable	Normal sowing date	Unfavourable	One	Unfavourable
13	Favourable	Late sowing	Favourable	None	Moderately favourable
14	Favourable	Late sowing	Favourable	One	Unfavourable
15	Favourable	Late sowing	Moderately favourable	None	Moderately favourable
16	Favourable	Late sowing	Moderately favourable	One	Unfavourable
17	Favourable	Late sowing	Unfavourable	None	Unfavourable
18	Favourable	Late sowing	Unfavourable	One	Unfavourable
19	Moderately favourable	Early sowing	Favourable	None	Favourable
20	Moderately favourable	Early sowing	Favourable	One	Unfavourable
21	Moderately favourable	Early sowing	Moderately favourable	None	Moderately favourable
22	Moderately favourable	Early sowing	Moderately favourable	One	Unfavourable
23	Moderately favourable	Early sowing	Unfavourable	None	Unfavourable
24	Moderately favourable	Early sowing	Unfavourable	One	Unfavourable
25	Moderately favourable	Normal sowing date	Favourable	None	Moderately favourable
26	Moderately favourable	Normal sowing date	Favourable	One	Unfavourable
27	Moderately favourable	Normal sowing date	Moderately favourable	None	Moderately favourable
28	Moderately favourable	Normal sowing date	Moderately favourable	One	Unfavourable
29	Moderately favourable	Normal sowing date	Unfavourable	None	Unfavourable
30	Moderately favourable	Normal sowing date	Unfavourable	One	Unfavourable
31	Moderately favourable	Late sowing	Favourable	None	Moderately favourable
32	Moderately favourable	Late sowing	Favourable	One	Unfavourable
33	Moderately favourable	Late sowing	Moderately favourable	None	Moderately favourable
34	Moderately favourable	Late sowing	Moderately favourable	One	Unfavourable
35	Moderately favourable	Late sowing	Unfavourable	None	Unfavourable
36	Moderately favourable	Late sowing	Unfavourable	One	Unfavourable
37	Unfavourable	Early sowing	Favourable	None	Moderately favourable
38	Unfavourable	Early sowing	Favourable	One	Unfavourable
39	Unfavourable	Early sowing	Moderately favourable	None	Unfavourable
40	Unfavourable	Early sowing	Moderately favourable	One	Unfavourable
41	Unfavourable	Early sowing	Unfavourable	None	Unfavourable
42	Unfavourable	Early sowing	Unfavourable	One	Unfavourable
43	Unfavourable	Normal sowing date	Favourable	None	Unfavourable
44	Unfavourable	Normal sowing date	Favourable	One	Unfavourable
45	Unfavourable	Normal sowing date	Moderately favourable	None	Unfavourable
46	Unfavourable	Normal sowing date	Moderately favourable	One	Unfavourable
47	Unfavourable	Normal sowing date	Unfavourable	None	Unfavourable
48	Unfavourable	Normal sowing date	Unfavourable	One	Unfavourable
49	Unfavourable	Late sowing	Favourable	None	Unfavourable
50	Unfavourable	Late sowing	Favourable	One	Unfavourable
51	Unfavourable	Late sowing	Moderately favourable	None	Unfavourable
52	Unfavourable	Late sowing	Moderately favourable	One	Unfavourable
53	Unfavourable	Late sowing	Unfavourable	None	Unfavourable
54	Unfavourable	Late sowing	Unfavourable	One	Unfavourable

Annexe 9. Utility function used for the calculation of the value of the aggregative attribute “Effects of soil and climate” (screenshot of the DEXi software).

	Soil	Climate	Effects of soil and climate
1	Favourable	Very favourable	Very favourable
2	Favourable	Favourable	Favourable
3	Favourable	Unfavourable	Unfavourable
4	Neutral	Very favourable	Very favourable
5	Neutral	Favourable	Favourable
6	Neutral	Unfavourable	Unfavourable

Annexe 10. Utility function used for the calculation of the value of the aggregative attribute “Primary inoculum management: interaction between crop sequence and tillage” (screenshot of the DEXi software).

	Preceding crop	Pre-preceding crop	Tillage after preceding crop	Tillage after pre-preceding crop	Primary inoculum management
1	Host	Host	Non-inversion tillage	Non-inversion tillage	Favourable
2	Host	Host	Non-inversion tillage	Inversion tillage	Favourable
3	Host	Host	Inversion tillage	Non-inversion tillage	Unfavourable
4	Host	Host	Inversion tillage	Inversion tillage	Moderately favourable
5	Host	Risk amplifying non-host	Non-inversion tillage	Non-inversion tillage	Favourable
6	Host	Risk amplifying non-host	Non-inversion tillage	Inversion tillage	Favourable
7	Host	Risk amplifying non-host	Inversion tillage	Non-inversion tillage	Unfavourable
8	Host	Risk amplifying non-host	Inversion tillage	Inversion tillage	Unfavourable
9	Host	Non host	Non-inversion tillage	Non-inversion tillage	Favourable
10	Host	Non host	Non-inversion tillage	Inversion tillage	Favourable
11	Host	Non host	Inversion tillage	Non-inversion tillage	Unfavourable
12	Host	Non host	Inversion tillage	Inversion tillage	Moderately favourable
13	Risk amplifying non-host	Host	Non-inversion tillage	Non-inversion tillage	Favourable
14	Risk amplifying non-host	Host	Non-inversion tillage	Inversion tillage	Unfavourable
15	Risk amplifying non-host	Host	Inversion tillage	Non-inversion tillage	Unfavourable
16	Risk amplifying non-host	Host	Inversion tillage	Inversion tillage	Moderately favourable
17	Risk amplifying non-host	Risk amplifying non-host	Non-inversion tillage	Non-inversion tillage	Unfavourable
18	Risk amplifying non-host	Risk amplifying non-host	Non-inversion tillage	Inversion tillage	Unfavourable
19	Risk amplifying non-host	Risk amplifying non-host	Inversion tillage	Non-inversion tillage	Unfavourable
20	Risk amplifying non-host	Risk amplifying non-host	Inversion tillage	Inversion tillage	Unfavourable
21	Risk amplifying non-host	Non host	Non-inversion tillage	Non-inversion tillage	Unfavourable
22	Risk amplifying non-host	Non host	Non-inversion tillage	Inversion tillage	Unfavourable
23	Risk amplifying non-host	Non host	Inversion tillage	Non-inversion tillage	Unfavourable
24	Risk amplifying non-host	Non host	Inversion tillage	Inversion tillage	Unfavourable
25	Non host	Host	Non-inversion tillage	Non-inversion tillage	Unfavourable
26	Non host	Host	Non-inversion tillage	Inversion tillage	Unfavourable
27	Non host	Host	Inversion tillage	Non-inversion tillage	Unfavourable
28	Non host	Host	Inversion tillage	Inversion tillage	Moderately favourable
29	Non host	Risk amplifying non-host	Non-inversion tillage	Non-inversion tillage	Unfavourable
30	Non host	Risk amplifying non-host	Non-inversion tillage	Inversion tillage	Unfavourable
31	Non host	Risk amplifying non-host	Inversion tillage	Non-inversion tillage	Unfavourable
32	Non host	Risk amplifying non-host	Inversion tillage	Inversion tillage	Unfavourable
33	Non host	Non host	Non-inversion tillage	Non-inversion tillage	Unfavourable
34	Non host	Non host	Non-inversion tillage	Inversion tillage	Unfavourable
35	Non host	Non host	Inversion tillage	Non-inversion tillage	Unfavourable
36	Non host	Non host	Inversion tillage	Inversion tillage	Unfavourable

Annexe 11. Utility function used for the calculation of the value of the aggregative attribute “Mitigation through crop status” (screenshot of the DEXi software).

	Cultivar choice	Level of N fertilisation	Sowing rate	Mitigation through crop status
1	Very susceptible to susceptible	Excess level	High	Favourable
2	Very susceptible to susceptible	Excess level	Normal	Favourable
3	Very susceptible to susceptible	Excess level	Low	Favourable
4	Very susceptible to susceptible	Balanced level	High	Favourable
5	Very susceptible to susceptible	Balanced level	Normal	Favourable
6	Very susceptible to susceptible	Balanced level	Low	Favourable
7	Moderately susceptible	Excess level	High	Moderately favourable
8	Moderately susceptible	Excess level	Normal	Moderately favourable
9	Moderately susceptible	Excess level	Low	Moderately favourable
10	Moderately susceptible	Balanced level	High	Moderately favourable
11	Moderately susceptible	Balanced level	Normal	Moderately favourable
12	Moderately susceptible	Balanced level	Low	Moderately favourable
13	Quite to very resistant	Excess level	High	Unfavourable
14	Quite to very resistant	Excess level	Normal	Unfavourable
15	Quite to very resistant	Excess level	Low	Unfavourable
16	Quite to very resistant	Balanced level	High	Unfavourable
17	Quite to very resistant	Balanced level	Normal	Unfavourable
18	Quite to very resistant	Balanced level	Low	Unfavourable

Annexe 12. Utility function used for the calculation of the value of the aggregative attribute “Climate” (screenshot of the DEXi software).

	Autumn/winter	Spring	Climate
1	Very favourable	Very favourable	Very favourable
2	Very favourable	Favourable	Favourable
3	Very favourable	Unfavourable	Unfavourable
4	Favourable	Very favourable	Very favourable
5	Favourable	Favourable	Favourable
6	Favourable	Unfavourable	Unfavourable
7	Unfavourable	Very favourable	Favourable
8	Unfavourable	Favourable	Unfavourable
9	Unfavourable	Unfavourable	Unfavourable

Annexe 13. Available knowledge in the scientific literature describing the effects of Cropping Practices and the Production Situation on the severity of brown Rust on Wheat. Cropping practices and weather can be favourable (+), unfavourable (-) or neutral (0) to the development of brown Rust. The intensity of the considered factor is summarised with 4 classes: 0, no effect; +, slight; ++, significant; +++, crucial.

Factor	Direction of the effect	Intensity of the effect	Impact on brown rust development	References
Tillage	0	0	No conclusion on the precise effect of soil tillage. Nevertheless, tillage seemed to be unfavourable for rotations with continuous wheat because volunteers'wheat emergence is greater than with no-till system.	(Ogg and Parker, 1989; Roelfs et al., 1992; Derksen et al., 1993; Pickett, 1993; Anderson and Soper, 2003; Plaskowska et al., 2009)
Volunteers wheat destruction	+	+	Presence of wheat volunteers, as reservoirs of inoculum for the autumn-planted winter wheat, favours the conservation of the disease during summer. The destruction of all volunteers' wheat would significantly reduce the survival of primary inoculum.	(Roelfs et al., 1992; Derksen et al., 1993; Pickett, 1993; Eversmeyer and Kramer, 2000; Blackshaw et al., 2001; Anderson and Soper, 2003; Bolton et al., 2008)
Preceding and pre-preceding crop	0	0	The effect of rotation is very poorly described and its impact is presumably very less important (no conservation on residues).	(Anderson and Soper, 2003)
Sowing date	+	++	Brown rust has often been reported to be more severe in early sown crops.	(Mishra et al., 1994; Moschini and Perez, 1999; Eversmeyer and Kramer, 2000; Bancal M.O., 2010)
N fertilisation rate	+	++	N favours BR in increasing foliar area and in creating a dense canopy and a wet microclimate. When nitrogen available in the host is limiting, spore production is reduced.	(Mascagni et al., 1997; de Vallavieille-Pope et al., 2000; Robert et al., 2002; Robert et al., 2004)

			Nitrogen deficiency tends to retard the epidemic development of most foliar diseases like powdery mildew, brown and yellow rusts.	
Sowing rate	+	+/-	Contradictory results. For some authors, seeding density rarely had a significant influence on rust severity. Others suggested that microclimatic changes resulting from higher plant densities have lead to improved conditions for disease development.	(Chester, 1946; Pflieger and Mundt, 1998)
Cultivar choice	+	+++	Genetic resistance is the most economical method of reducing yield losses due to leaf rust. To date, 46 leaf rust resistance genes have been designated and mapped in wheat. But, new races of BR have been introduced in different continents and reduce the number of effective rust-resistance genes available for use.	(Kolmer, 1996; Eversmeyer and Kramer, 2000; Kolmer, 2005; Ordonez and Kolmer, 2007; German et al., 2009; Goyeau et al., 2009; Goyeau and Lannou, 2011; Goyeau et al., 2012; Azzimonti, 2013)
Cultivar mixture	+	+	The severity of leaf rust was lower in mixtures relative to monocultures.	(Mahmood et al., 1991; Vilichmeller, 1992; Lannou et al., 1994a; Lannou et al., 1994b; Jackson and Wennig, 1997; Pflieger and Mundt, 1998; Mille and Vallavieille-Pope, 2001; Cox et al., 2004)
Climate	+	++	Urediniospores infect the telial host with free water on the leaf surface and temperatures of (5) or 10 (depends authors) –25 °C. Germination occurs after 4–8 h at 20 °C under 100% humidity. The uredinial stage was thought to be unable to survive the hot, dry summers as susceptible host plants were not available.	(Samborski, 1985; Roelfs, 1989; Vallavieille-Pope et al., 1995; Eversmeyer and Kramer, 2000; Sache et al., 2000; Bolton et al., 2008) (Roelfs et al., 1992) (de Vallavieille-Pope et al., 2000)

Interactions with the territory	+	+/-	<p>The rusts of wheat are fungal plant pathogens that can be disseminated thousands of kilometres across continents and oceans by wind.</p> <p>The landscape varietal composition influences the resistance level of the most grown wheat varieties by altering the structure of the pathogen populations.</p>	<p>(Kolmer, 1996; Sache et al., 2000; Bolton et al., 2008; Papaix et al., 2011)</p>
---------------------------------	---	-----	--	---

Annexe 14. Tableau récapitulatif des facteurs favorisant la septoriose du blé

Factor	Direction of the effect	Intensity of the effect	Impact on septoria development	References
Autumn - Winter climate	+	+++	Low temperatures and dry conditions during the crop emergence and the primary ascospore infection might affect the pathogen (inoculum reduction and slow disease progression), the host (phenology) or the interaction between the two and reduce septoria outbreak severity during spring.	[8, 19, 21, 41]
Spring climate	+	+++	The pycnidiospores contain pycnidia, released thanks to rainfall events, which swell and expel the spores when they are filled with water. Moreover the dispersion of pycnidiospores by splashing is the most important factor of the upper leaves infection. Thus, rainfall episodes and ambient humidity during April and May are the drivers of the outbreak of Septoria. Concerning the temperatures, the optimum for the germination is between 17 and 25°C and the minimal temperature is 2-4°C; the infection can be delayed if the temperature is below 7°C. At high temperatures, the leaves and stems emerge faster so the crop may be able to escape from the developing inoculum sources. So a cool and wet spring provides ideal conditions for high disease severity.	[2, 3, 6, 7, 8, 9, 18, 21, 25, 26, 30, 31, 38, 39, 41, 43]
Previous and pre-previous crop	+	++	Straw cereal as previous and/or pre-previous crop increase the yield losses. Septoria Tritici Blotch are widely reduced with an interval of 2 to 5 years between wheat crops or with a species diverse rotation.	[11, 41]
Tillage	+/-	+	When the previous crop is non-host preceded by wheat, tillage brings debris to the surface and can thus induce an early Septoria infection whereas conservation systems experience less STB outbreaks. When wheat follows wheat, Septoria decreases under tillage practices. In monoculture of wheat, no-tillage practices increase the septoria risk. Moreover, no-tillage often induces earlier sowing date which increases further the susceptibility of wheat to Septoria. Conservation technics leaves a residue-borne inoculum of Septoria tritici at the soil surface which increases the initial disease severity but does not cause a high disease outbreak.	[10, 27, 40, 41, 42]
Sowing date	+	+++	Early sowing of winter wheat induces more outbreaks during spring. There is less Septoria pressure for late sowing because it escapes from the first flow of contamination by ascospores. The inoculum is then less important at the end of the winter. Late sowing date also brings yield potential decreases if the sowing is too late because the crop is longer exposed to drought periods and to thermic scalding. More the sowing is delayed, faster is the leaves emergence (smaller is the phyllotherme), so the plant can avoid the septoria outbreak.	[2, 19, 22, 24, 30, 32, 35]
Cultivar choice	+	+++	The varietal choice is the most efficient lever of the agronomic control. It's difficult to combine disease resistance and high yield in a single variety so it's required to avoid the cultivars with the highest yield potential and the most resistant cultivar. Resistance to Septoria tritici depends on the presence of Stb genes. The genes Stb 2, Stb 4 and Stb 8 are known to be resistant in the field in France. The tolerant varieties help to reduce the disease pressure and its harmfulness but are only partially effective.	[2, 20, 36, 41]

Varietal mixture	+	+	Mixtures provided a small reduction of Septoria blotch severity relative to the pure stand. It's required to associate few varieties with different genes of resistance, usually inefficient alone, but complementary in a mixture and acting as a collective resistance. The cultivar association offers the same level of disease control than the fungicide treatment because it limits the spore transfer within the canopy. Indeed, the spores dropped on resistant varieties are lost and don't spread the disease. The association of 3 to 5 varieties is more efficient to limit the outbreak and stabilize the yield. The associated varieties have to have the same stem height to avoid shadow effect, and the precocity has to be homogeneous to avoid growth differences.	[13, 14, 16, 17, 36]
Nitrogen fertilization	+	+	The quantity of spores is lower in the low-N crops because the senescence of leaves occurs faster so the disease has not enough green area to progress. Disease incidence occurred later for the low-N crops. The amount of septoria significantly increases faster for high-N crops. The final disease severity and the senescence were also greater for high-N crops. Indeed, the N fertilization induces a denser canopy with more leaf wetness which enhances the spore germination. The form in which N is applied also plays a role in the disease severity: from 65 to 300 kg/ha of N and the use of calcium ammonium nitrate and urea increase the disease severity under favorable conditions.	[1, 28, 30, 33, 39]
Sowing density	+	++	Higher is the density of plants, greater are the disease pressure and the spread of the outbreak but this effect is not regular. Weak density can limit the disease pressure but also affects the yield. The increase of the tiller density induces an increase of the septoria development resulting from the creation of a more favorable microclimate within the leaf canopy.	[1, 2, 9, 13]
Fungicide spray	+	++	Two optimally positioned sprays induce a better yield than three sprays, at equivalent dose. The optimization of the dose, the positioning and the choice of the first treatment is the priority. For susceptible cultivars, it's only necessary to apply fungicides at GS 32 and 39. Effect of fungicide on resistant cultivars is more limited. Three sprays are efficient for susceptible cultivars when low doses are applied but it doesn't increase the yield or profitability. A full dose for susceptible cultivars and half dose for resistant ones induce a maximum profitability. Some strains of septoria are resistant to fungicide, particularly to SDHI (as carboxamide), so its application has to be limited to a single one. Association of triazoles with chlorothalonil or prochloraz is efficient against septoria.	[3, 7, 8, 21, 23, 34, 37, 39]
Grassy weeds	+/0	+	26 weeds and cultivated grasses are reported to be host of <i>Mycosphaerella graminicola</i> . So the infested grass around and within the wheat crop is a septoria foci and can be a source of primary inoculum. However, this wild grass cannot be a "green bridge" between the harvest and the volunteers because it withers at the same time as wheat. It would more act as a long-term conservation structure as the grass has a perennial growth. The systematic destruction of volunteers and weeds will not strongly decrease the septoria occurrence because it's not the main sources of primary infection.	[15, 41]
Volunteers	+	+	The inoculum can survive on wheat volunteers and stubbles as mycelium. To manage the disease, volunteers wheat, rye, barley, and wild grasses host of the pathogen can be destroyed before sowing. But volunteers have not a strong influence on septoria.	[21]

Annexe 15. Tableau récapitulatif de la bibliographie décrivant l'effet des différents facteurs qui impactent le développement de la fusariose et la contamination par le déoxynivalénol

Facteurs	Direction de l'effet	Intensité de l'effet	Impact sur le développement de la fusariose	Références
Travail du sol	+/-	+++	<p>L'infection par la fusariose, causée par la dispersion d'inoculum lors des pluies ou de l'irrigation, est augmentée par la quantité de résidus présents à la surface du sol.</p> <p>Le travail du sol en impactant le volume de résidus en surface impacte directement la survie de l'inoculum. Les techniques de travail du sol simplifiées augmentent donc la fréquence de fusariose, car elles laissent une grande quantité de résidus à la surface du sol. Certaines études concluent que plus le travail du sol est profond, moins il y a de fusariose. Certaines pratiques culturales qui mélangent les résidus avec le sol et ainsi augmentent leur dégradation permettent de diminuer la quantité d'inoculum.</p> <p>Les adventices peuvent également être une source d'inoculum.</p>	(Dill-Macky and Jones, 2000; Champeil, Dore and Fourbet, 2004; Steinkellner and Langer, 2004; Bateman, 2005; Koch, Pringas and Maerlaender, 2006; Oldenburg, Brunotte and Weinert, 2007; Osborne and Stein, 2007; Fernandez et al., 2008; Maiorano et al., 2008; Lori et al., 2009; Blandino et al., 2010; Landschoot et al., 2011; Vanova et al., 2011; Blandino et al., 2012; Postic et al., 2012)
Précédent cultural	+	++	Le précédent cultural impacte différemment la contamination par la fusariose suivant le fait qu'il soit un hôte potentiel pour la maladie et la vitesse de dégradation de ses résidus. Le maïs et le sorgho sont des précédents très favorables, car ils sont de bons hôtes pour la maladie, le stock d'inoculum initialement présent dans la parcelle est donc d'autant plus élevé. D'autre part, la faible vitesse de dégradation de leurs résidus favorise la conservation de l'inoculum. Le complexe fongique est aussi différent suivant le précédent cultural.	(Teich and Hamilton, 1985; Dill-Macky and Jones, 2000; Champeil et al., 2004; Schaafsma, Tamburic-Ilincic and Hooker, 2005; Koch et al., 2006; Klem et al., 2007; Osborne and Stein, 2007; Blandino et al., 2010; Mueller et al., 2010)
Gestion des résidus du précédent cultural	+	++	La masse de résidus au printemps impacte beaucoup le volume d'inoculum à la floraison. Quand les résidus du précédent cultural sont exportés, le volume d'inoculum de fusariose est fortement réduit. Si les résidus sont restitués, un broyage peut augmenter la vitesse de dégradation des résidus. Une meilleure dégradation diminue ainsi le risque de contamination.	(Bateman, 2005; Koch et al., 2006; Oldenburg et al., 2007; Osborne and Stein, 2007; Blandino et al., 2010; Blandino et al., 2012)
Fertilisation azotée	+	+	L'effet de la fertilisation azotée ne fait pas l'unanimité dans la littérature. Certains auteurs concluent qu'elle n'a pas d'effet sur la fusariose. Cependant, beaucoup	(Martin, Macleod and Caldwell, 1991; Lemmens et al., 2004; Heier et al.,

			d'études concluent que la fusariose est favorisée par des fertilisations azotées excédentaires et que des fertilisations fortement déficitaires freinent son développement.	2005; Subedi, Ma and Xue, 2007; van der Burgt et al., 2011; Vanova et al., 2011)
Choix variétal	-	+++	La variété est un des facteurs les plus importants qui conditionne le développement de la fusariose et la contamination en don. Il n'existe actuellement pas de variété totalement résistante à la fusariose ou au déoxynivalénol. Différents niveaux de résistance existent suivant les variétés. Ils ne sont pas les mêmes pour la fusariose et le don.	(Champeil et al., 2004; Koch et al., 2006; Blandino et al., 2012)
Régulateur de croissance	+	+	Certaines études montrent que l'utilisation de régulateurs de croissances favorise la contamination par la fusariose et le don, mais ce facteur est contesté. Une hypothèse avancée est le fait que les régulateurs diminuent la distance qui sépare le sol et les épis et ainsi, facilite la monté de l'inoculum par effet splash.	(Martin et al., 1991; Fauzi and Paulitz, 1994; Bateman, 2005; Mankeviciene et al., 2008)
Traitement fongicide	-	+	L'efficacité des traitements fongiques est variable et souvent faible. Elle est fortement conditionnée par la période d'application et la qualité de la pulvérisation. Les fongicides de la famille des triazoles sont efficaces sur les deux genres fongiques. Les strobilurines elles sont efficaces principalement sur <i>Microdochium</i> . Les triazoles sont donc les seuls à réduire le risque de contamination par le don. Certaines études montrent que dans certains cas l'application de strobilurines augmente la contamination en don en favorisant le développement des espèces du genre <i>Fusarium</i> au détriment de celles du genre <i>Microdochium</i> .	(Jacobsen, 1977; Martin et al., 1991; D'Mello et al., 1998; Matthies, Walker and Buchenauer, 1999; Edwards et al., 2001; Simpson et al., 2001; Siranidou and Buchenauer, 2001; Pirgozliev et al., 2002; Heier et al., 2005; Koch et al., 2006; Blandino et al., 2012)
Climat	+/-	++++	Le climat est le facteur le plus important qui conditionne le développement de la fusariose ou la contamination par le déoxynivalénol. Il impacte aussi la compétition entre les différentes espèces de fusariose. Autour de la floraison, un climat avec des températures faibles et des pluies importantes favorise la domination des espèces du genre <i>Microdochium</i> . Un climat plus chaud avec des épisodes orageux favorise les espèces du genre <i>Fusarium</i> et donc potentiellement la contamination par le déoxynivalénol. Une humidité relative importante favorise également le développement de la fusariose.	(Parry, Jenkinson and McLeod, 1995; Moschini and Fortugno, 1996; Moschini et al., 2001; Walker et al., 2001; Cromey et al., 2002; Hooker, Schaafsma and Tamburic-Ilincic, 2002; De Wolf, Madden and Lipps, 2003; Hooker and Schaafsma, 2003; Klem et al., 2007; Paul et al., 2007; Schaafsma and Hooker, 2007; Prandini et al., 2009; Froment et al., 2011; Bondalapati et al., 2012; Kriss et al., 2012)
Irrigation	+/-	++++	L'irrigation impacte la maladie de la même façon que le climat en favorisant la dispersion de l'inoculum.	(Leplat et al., 2013)

Annexe 16. Synthèse bibliographique des modèles existants sur la fusariose

Référence	Pays de l'étude	Type	Description	Échelle	Facilité d'utilisation	Limites
(Moschini and Fortugno, 1996; Moschini et al., 2001)	Argentine	Déterministe/ Statistique	Modèles prédisant l'incidence de fusariose basée sur des facteurs météorologiques. Modèle issu de régressions linéaires comprenant entre 1 et 3 variables entrantes indépendantes.	Parcelle/ 8 j avant l'épiaison à 26 à 32 j après	+ / De 1 à 3 variables entrantes	Spécifique à une région humide de la pampa
(Detrixhe et al., 2003)	Belgique	Déterministe/ Statistique	Modèle basé sur des données radars pour produire des indicateurs de risques. Il permet d'obtenir et de définir des zones de production à risque.	Ensemble de parcelles	- Nécessité d'avoir des données radars	En cour de validation
(Rossi et al., 2003)	Italie	Déterministe/ Mécaniste	Modèle décrivant les mécanismes de développement des 4 principales espèces de fusarioses. Il permet d'obtenir un risque d'infection journalier.	Parcelle/ Saison de culture	-	Modèle assez complexe et précision faible
(De Wolf et al., 2003; van Maanen and Xu, 2003; Xu, 2003)	États-Unis	Déterministe/ Statistique	Modèle basé sur une régression logistique utilisant des données issues de 50 sites-années. Le modèle est basé sur des variables climatiques comme l'humidité relative, la pluviométrie, la température ou la durée de conditions particulières.	Parcelle/ 7 j avant la floraison à 10 j après	++	Faible précision
(Musa et al., 2007)	Suisse	Déterministe/ Mécaniste	Modèle prenant en compte l'effet de certaines pratiques culturales et du climat sur le développement de la fusariose.	Parcelle	-	Détail du modèle non disponible
(Ponte et al., 2005)	Brésil	Déterministe/ Mécaniste	Modèle climatique utilisé pour prédire un index de risque d'infection de fusariose. Modèle décrivant les mécanismes du développement de la maladie ainsi que les facteurs impactant les	Parcelle/ De l'épiaison à la récolte	-	Modèle complexe nécessitant des variables entrantes climatiques et de

			différents stades de ce développement.			développement de la culture assez fine
(Bondalapati et al., 2012)	États-Unis	Déterministe/ Statistique	Régressions logistiques simples basées sur des données issues d'expérimentations effectuées dans les plaines du nord des États-Unis. Les régressions sont basées sur des indicateurs qui sont calculés à l'aide de données climatiques. Des données climatiques horaires sont souvent utilisées.	Parcelle/ 10 j avant l'épiaison à la récolte	- Variables entrantes dans le modèle difficile à obtenir	Nécessité d'avoir des données climatiques horaires Faible précision
(Kriss et al., 2012)	Europe	Déterministe/ Statistique	Études caractérisant l'impact de différents facteurs environnementaux sur la fusariose	Parcelle/ 18 j avant la floraison à la récolte	-	Équation non disponible Faible précision
(Guo et al., 2010)	Canada	Déterministe/ Statistique	Modèle qui met en relation les niveaux d'atteinte des deux cultures précédant la culture étudiée pour prédire le niveau de maladie.	Parcelle/ 3 ans	-	Données entrantes pas facilement accessibles
(Paul et al., 2007)	États-Unis	Déterministe/ Statistique	Modèles utilisant des relations logarithmiques et linéaires pour prédire la densité d'inoculum de <i>fusarium graminearum</i>	Parcelle/ Saison de culture	-	Beaucoup de variables entrantes, Équation pas facilement utilisable

Annexe 17. Synthèse bibliographique des modèles existants sur les teneurs en déoxynivaléol

Référence	Pays de l'étude	Type	Description	Échelle	Facilité d'utilisation	Limites
(Hooker et al., 2002; Hooker and Schaafsma, 2003; Hooker and Schaafsma, 2005; Schaafsma and Hooker, 2007)	Canada	Déterministe/ Statistique	Au début, modèle climatique issu de régression linéaire basée sur des données récoltées dans 399 champs au Canada entre 1996 et 2000. Par la suite des facteurs agronomiques ont été inclus dans le modèle. Modèle commercialisé pour prédire des risques de contamination en Don.	Parcelle/ De 7 j avant l'épiaison à 10 j après.	++	Équations climatiques uniquement disponibles, car le modèle est commercialisé
(Rossi et al., 2003)	Italie	Déterministe/ Mécaniste	Modèle décrivant les mécanismes de contamination des grains par le déoxynivaléol. Il permet d'obtenir un risque de contamination journalier.	Parcelle/ Saison de culture	-	Modèle assez complexe et précision faible
(Musa et al., 2007)	Suisse	Déterministe/ Mécaniste	Modèle prenant en compte l'effet de certaines pratiques culturales et du climat sur la contamination par le déoxynivaléol.	Parcelle	-	Détail du modèle non disponible
(Campa et al., 2005)	Argentine, Brésil	Déterministe/ Statistique	Le modèle est basé sur une évaluation des relations entre facteurs biotiques et abiotiques avec la fusariose. Il prédit la concentration en don à la récolte	Parcelle/ Autour de la floraison	-	Adapté pour des contextes spécifiques, complexe à utiliser
(Bondalapati et al., 2012)	États-Unis	Déterministe/ Statistique	Régressions logistiques simples basées sur des données issues d'expérimentations effectuées dans les plaines du nord des États-Unis. Les régressions sont basées sur des indicateurs qui sont calculés à l'aide de données climatiques. Des données climatiques horaires sont souvent utilisées.	Parcelle/ 10 j avant l'épiaison à la récolte	+/- Variables entrantes dans le modèle difficile à obtenir	Nécessité d'avoir des données climatiques horaires Faible précision

(Kriss et al., 2012)	Europe	Déterministe/ Statistique	Études caractérisant l'impact de différents facteurs environnementaux sur la teneur en déoxynivalénol à la récolte.	Parcelle/ 18 j avant la floraison à la récolte	-	Pas d'équations disponibles Faible précision
(Froment et al., 2011)	France et Belgique	Déterministe/ Statistique	Outil développé par Syngenta pour les coopératives pour estimer des niveaux de risque de contamination par le déoxynivalénol avant la récolte.	Régional	-	Équation non disponible
(Klem et al., 2007)	République Tchèque	Déterministe/ Statistique	Modèle utilisant des données climatiques et le précédent cultural utilisés pour prédire des teneurs en déoxynivalénol dans le grain récolté.	Parcelle/ Saison de culture	-	Équation non donnée

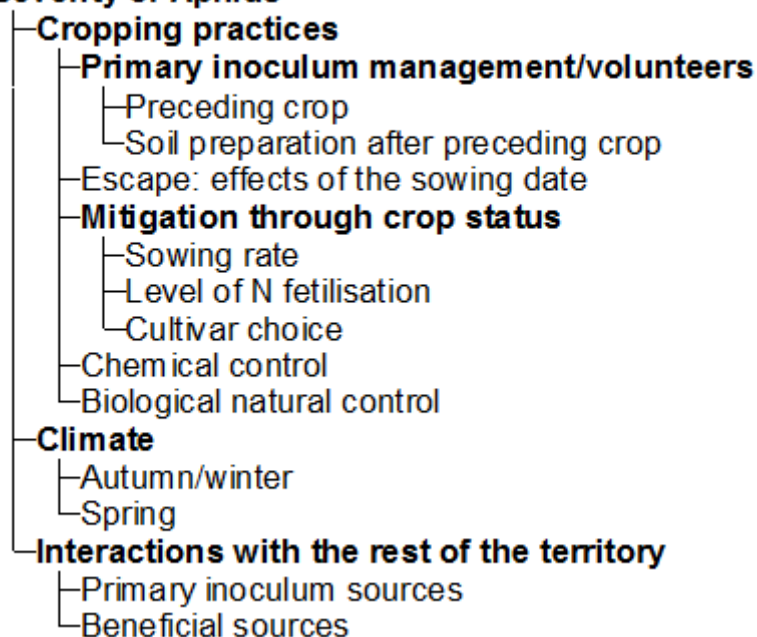
Annexe 18. Échelles choisies pour les attributs de base des modèles Fusariose et DON

Attribut	Échelle	Règle ou description
Niveau de fertilisation azotée	< 50 U / entre 50 U et 180 U / > 180 U	Quantité totale d'azote apporté sous forme minérale ou organique
Niveau de résistance de la variété	Peu sensible/ Moyennement sensible / Sensible	Échelle basée sur les notations de résistance établie par le CTPS ⁶ lors de l'inscription de la variété. Note de 1 à 3 : « sensible », 4 et 5 : « moyennement sensible » et supérieur à 5 : « peu sensible ». Ces notes ne sont pas identiques pour la fusariose et pour le Don.
Travail du sol	Travail du sol avec inversion / Travail du sol sans inversion / Semis direct	Travail du sol utilisé avant l'implantation du blé
Gestion des résidus du précédent	Exportés / Restitués avec broyage / Restitué sans broyage	Méthode de gestion des résidus de la culture précédente
Précédent cultural	Neutre / Peu favorable / Favorable / Très favorable	La classification des différents précédents en variable qualitative est basée sur des données issues de la synthèse bibliographique. Un tableau de synthèse est disponible en Annexe 11.
Protection phytosanitaire	Oui / Non Azole / Non azole	Cet attribut prend différentes modalités suivant les modèles. Le modèle fusariose prend en compte s'il y a eu ou pas de traitement fongique contre la maladie. Le modèle Don prend en compte le fait qu'il y ait eu application d'un fongicide de la famille des azoles ou pas sur épis. Les strobilurines ne limitent pas la contamination en Don.
Effet du climat	Défavorable/ Peu favorable/ Favorable / Très favorable	Le climat est qualifié en se basant sur des règles de décision utilisant un modèle existant : DONcast.

Annexe 19. Structure du modèle IPSIM-Wheat-Aphids

Attribute

Severity of Aphids



Attribute

Severity of Aphids

Attribute	Scale
— Cropping practices	Several colonies present ; Few colonies present; 0 colony
— Primary inoculum management/volunteers	Favourable ; Moderately favourable; Unfavourable
— Preceding crop	Host ; Non host
— Soil preparation after preceding crop	Tillage ; Non tillage with grinding; Non tillage without grinding
— Escape: effects of the sowing date	Early sowing ; Normal sowing; Late sowing
— Mitigation through crop status	Favourable ; Moderately favourable; Unfavourable
— Sowing rate	High ; Medium; Low
— Level of N fertilisation	Excess level ; Balanced level; Limited level
— Cultivar choice	Favourable ; Unfavourable
— Chemical control	0 insecticide treatment ; one insecticide treatment
— Biological natural control	Important ; Low or unknown
— Climate	Favourable ; Moderately favourable; Unfavourable
— Autumn/winter	Favourable ; Unfavourable
— Spring	Favourable ; Unfavourable
— Interactions with the rest of the territory	Favourable ; Moderately favourable; Unfavourable
— Primary inoculum sources	Important ; Normal at low
— Beneficial sources	Important ; Normal at low

Annexe 20. Présentation de trois modèles de prédiction des infestations en adventices sur blé

Nom du modèle/outils	Objectif	Variables d'entrée	Variables de sortie	Description
Florsys [Colbach et al., 2008] : (Version pluri spécifique s'appuyant sur la version mono- spécifique "Vulpin des champs" AlomySys)	Améliorer la connaissance du système complexe 'champs cultivé / communauté adventice' en favorisant l'analyse des interactions entre les techniques culturales, la biologie des espèces et le climat Réaliser des expérimentations virtuelles en simulant des systèmes de culture alternatifs aux systèmes actuels, très dépendants des herbicides	Le stock semencier initial, décrit par la densité de semences de chaque espèce dans le sol et de leur répartition verticale au sein de l'horizon travaillé (de 0 à 30 cm de profondeur). Les éléments des systèmes de culture : travail du sol, caractéristiques d'implantation de la culture (variété, densité), opérations de lutte contre les adventices, fertilisation et date de récolte. L'environnement pédo-climatique : température, pluviométrie et ETP quotidiennes, ainsi que la texture et les conditions hydro-thermiques du sol.	Le modèle calcule tous les jours la densité d'individus de chaque espèce à chaque stade de croissance (plantule, stade végétatif, floraison, etc.) ainsi que le stock semencier viable dans le sol	Florsys est constitué de deux modules principaux : - un module de 'germination-levée' rendant compte de tous les processus affectant le stock semencier : mouvements de semences sous l'effet du travail du sol, induction-levée de dormances, imbibition, germination, élongation souterraine de la plantule ; - un module de 'croissance-compétition-production semencière' rendant compte des processus de compétition pour la lumière déterminant les différences de production de biomasse et de nombre de semences entre les espèces et les individus.
ODERA-Systèmes [Agro-Transfert Ressources et Territoires, 2009] : Outil d'évaluation du Risque en Adventices dans les Systèmes de culture	Analyser les pratiques agronomiques de l'agriculteur : Évaluation du risque en adventices dans le système de culture actuel Construire un plan d'actions le plus défavorable possible à la flore dominante: Évaluation du risque en adventices lors de simulations de modifications de pratiques ou de construction d'un nouveau système	L'utilisateur renseigne les éléments relatifs à la parcelle (nom, adventices préoccupantes) et au système de culture (succession culturale, les passages de travail superficiel du sol en interculture, labour ou non-labour...).	Le résultat du diagnostic apparaît sous la forme d'une grille de diagnostic du risque en adventices L'utilisateur peut faire varier les variables d'entrée et apprécier l'influence sur le risque d'infestation en adventices	C'est un outil : - d'aide à la (re-)conception de systèmes de culture tout en évaluant un risque en adventices. - d'animation et de discussion avec l'agriculteur qui permet d'objectiver l'effet des moyens agronomiques sur les adventices. C'est aussi et surtout un outil qui vise la réappropriation de notions d'agronomie de base par les conseillers et les agriculteurs, condition facilitante pour permettre la réduction des
WECOF-DSS [Neuhoft et al., 2005]: (Strategies of Weed Control in Organic Farming)	C'est un outil pour optimiser la gestion des adventices dans la culture du blé en agriculture biologique.	L'utilisateur doit renseigner différentes informations concernant : • le climat • le type de sol • la rotation • le niveau de fertilisation • la flore présente et le niveau d'infestation • la densité et la date de semis • le labour • le désherbage mécanique	Les préconisations fournies par l'outil concernent par exemple le choix variétal, le désherbage mécanique ou le travail du sol.	

Annexe 21. Caractéristiques des principales adventices du blé

	Références	Barralis et al. (1988); ITAB. (2005); ITAB/GRAB (2012); Mamarot et Rodriguez (2011); Chambre régionale d'agriculture des Pays de la Loire (2006); CETIOM (2011-2012); INRA (2000)					CETIOM (?); Arvalis (?); Chambre régionale d'agriculture des Pays de la Loire (2006)	
Nom scientifique	Nom commun	Classe	TAD	Profondeur de germination	Période de levée	Mode de levée	Potentiel semencier	Présence de résistance en France dans le blé
<i>Galium aparine</i>	Gailllet grateron	Dicotylédone annuelle	Elevé (>70%)	Profonde (> 12cm)	Automne/ hiver	Groupé	Faible	Non
<i>Avena fatua</i>	Folle avoine	Monocotylédone-Graminée Annuelle	Elevé (>70%)	Profonde (> 12cm)	Hiver - Printemps	Echelonné	Faible	Oui
<i>Papaver rhoeas</i>	Coquelicot	Dicotylédone annuelle	Faible	Superficielle/ moyenne	Toute l'année	Groupé	Moyen	Non
<i>Alopecurus myosuroides</i>	vulpin	Monocotylédone-Graminée Annuelle	Elevé (>70%)	Superficielle/ moyenne	Automne/ Hiver - Printemps	Groupé	Moyen	Oui
<i>Loium multiflorum</i>	ray grass	Monocotylédone-Graminée Annuelle	Elevé (>70%)	Superficielle (< 6 cm)	Toute l'année	Echelonné	Moyen	Oui
<i>Veronica persica</i>	véronique de Perse	Dicotylédone annuelle	Faible	Superficielle/ moyenne	Toute l'année	Echelonné	Moyen	Non
<i>Stellaria media</i>	Stellaire = Mouron des oiseaux	Dicotylédone annuelle	Faible	Superficielle/ moyenne	Toute l'année	Groupé	Moyen	Non
<i>Veronica hederifolia</i>	véronique à feuilles de lierres	Dicotylédone annuelle	Faible	Moyenne	Automne/ hiver	Groupé	Faible	Non

Annexe 22. Tableau récapitulatif des facteurs favorisant les adventices du blé

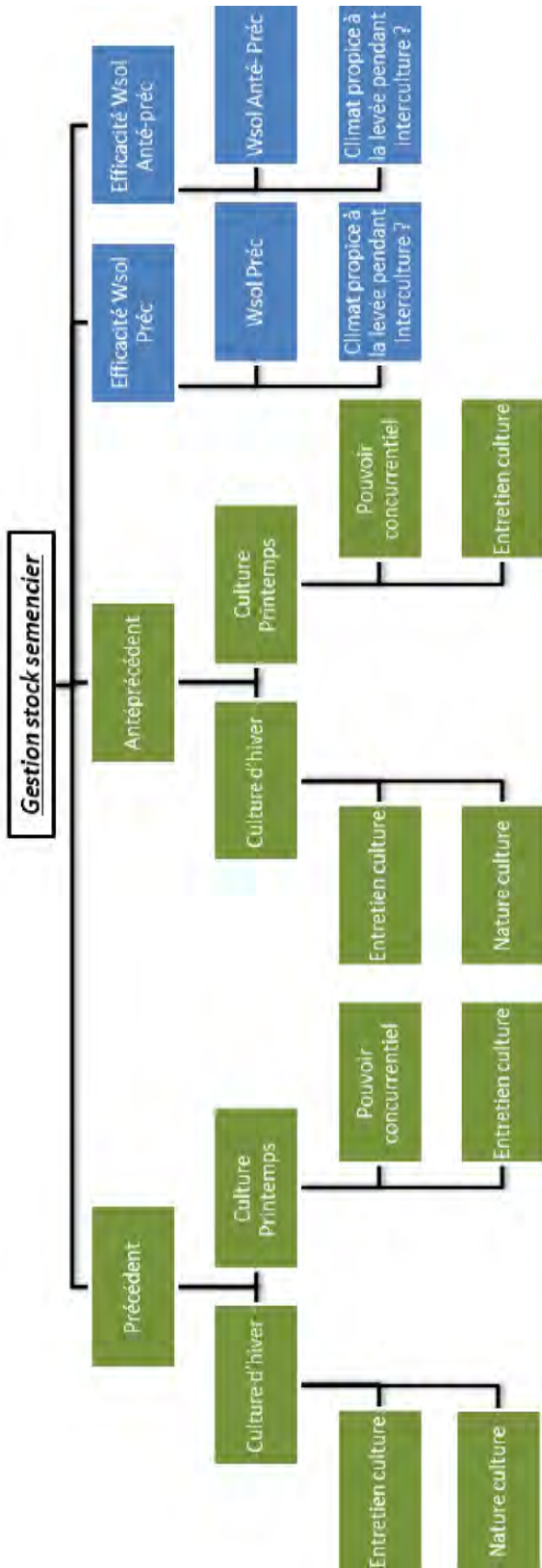
Référence Bibliographique	Attribut 1	Attribut 2	Valeur	Commentaire	Effet
Koocheki et al., (2008) ; Blackshaw et al., (2001); Seibutis et Deveikytė, (2006) ; Munier-Jolain et al., (2008) ; Acta-Arvalis, (2012) ; Chauvel et al., (2007) ; Liebman et Davis, (2000) ; Lutman et al., (2013) ; Teresa et Verdú, (2003) ; Liebman et Dyck, (1993) ; Chambre régionale d'agriculture des Pays de la Loire (2006) ; Agro-transfert, (2011 b.) ; Agro-transfert, (2007) ; ITAB (2012 b.)	Précédent		<i>Blé</i> <i>Betterave</i> <i>Maïs</i> <i>Jachère</i> <i>Colza</i> <i>Lin</i> <i>Protéagineux (pois, féverole, lupin)</i> <i>Pois</i> <i>Céréales printemps (orge)</i> <i>Blé de printemps</i> <i>Culture nettoyante</i> <i>Céréales denses ou hautes (avoine, seigle, triticale, association triticale/pois...)</i> <i>cultures d'automne</i> <i>Intégration cultures de printemps</i>	La nature du précédent ou de l'anté-précédent influe sur le développement des adventices notamment à travers la conduite générale qui lui est associé (date de semis, efficacité du désherbage...).	Dépend des adventices, de la culture (type, date de semis, entretien) et de la rotation (diversité, longueur)
	Rotation		<i>3 cultures de printemps sur 5</i> <i>Intégration prairie temporaire (3-4 ans)</i> <i>Rotation longue et variée avec culture printemps/été</i> <i>Limiter culture d'hiver</i> <i>% de céréales d'hiver dans la rotation</i> <i>Nombre de cultures différentes</i> <i>Rotation (rotation avec 75% de céréales = Blé d'hiver - Orge printemps - pois ; mixed rotation = Blé d'hiver-betterave - orge printemps - trèfle des prés)</i>	La longueur et la diversité dans la rotation sont des paramètres à prendre en compte, cependant ces données sont difficilement accessibles par les réseaux de suivis actuels. Les informations s'arrêtent souvent à l'année N-2	
Gill et Holmes, (1997)	Mise en place prairie/pâturage		<i>Pâturage à de Printemps à forte densité d'animaux</i> <i>Pâtures+herbicide (paraquat) = spray topping</i>	Ce facteur sera pris en compte dans la modalité "type de précédent-antéprécédent" car il constitue une culture à intégrer dans la rotation.	En général: effet négatif sur les adventices
Moyer et al., (2007); Chassigne et al., (2009); Liebman et Davis, (2000)	Couverture à l'interculture	Résidus de culture au sol (allélopathie / étouffement)	<i>résidus de méliot au sol</i> <i>Trèfle</i> <i>Luzerne</i>	Cette action qui peut avoir un impact par phénomène d'allélopathie ou étouffement, présente peu d'étude et les données disponibles pour utiliser le modèle ne tiendront pas forcément compte de cet élément.	Effet encore flou car peut-être autant nuisible pour adventices que pour la culture
		Couvert végétal	<i>3 ans de cultures pérennes Ray grass/ trèfle blanc</i> <i>1,5 ans de Brome</i> <i>Vesces en culture de couverture d'hiver</i> <i>Jachère</i> <i>Moutarde blanche</i>	Tout comme la mise en pâturage, cet élément sera intégrer à l'attribut "précédent-antéprécédent",	En général: effet négatif sur les adventices

Référence bibliographique	Attribut 1	Attribut 2	Valeur	Commentaires	Effet
Dawit et David, (1997) ; Barberi et al., (1998) ; Céline Zambujo, (2010) ; Rusu et al., (2006) ; Bonin et Labreuche, (2007) ; Pekrun et Claupein, (2006) ; Murphy et Lemerle, (2006) ; Blackshaw et al., (2001) ; Seibutis et Feiza, (2008) ; Chassigne et al., (2009) ; Rasmussen, (2004) ; Cultivar, (2010) ; Shrestha et al., (2002) ; Colbach et al., (2008) ; Munier-Jolain et al., (2008) ; Bond et Grundy, (2001) ; Zamin et al., (1997) ; Lutman et al., (2013) ; McCloskey et al., (1996) ; Teresa et Verdú, (2008) ; Sanjin-Montanya et al., (2013) ; Munalied et al., (2001) ; Chambre régionale d'agriculture des Pays de la Loire (2006) ; Chassigne et al., (2009)	Travail du sol	Faux semis	1 passage plusieurs passages Profond avec inversion Profond sans inversion Superficiel Non travail Conventionnel (forte perturbation du sol)	C'est le levier agronomique le plus étudié dans la gestion des adventices. Les données peuvent parfois être contradictoire car ce paramètre est influencé notamment par les conditions climatiques. Avec la rotation et le désherbage, il constitue le facteur ayant le plus d'influence sur le développement des adventices.	En général: effet négatif sur le développement des adventices Effet dépend des adventices et notamment du TAD et de la profondeur de germination
	Type de semis		Direct Classique	En ne perturbant le sol que sur la ligne de semis, cette méthode a une action sur le développement des adventices	En général: effet négatif sur le développement des adventices

Référence bibliographique	Attribut 1	Attribut 2	Valeur	Effet / Commentaires
Rasmussen, (2004) ; Grujeda et al., (2002) ; ITAB (2012)	Désherbage mécanique		Houe herse étrille	Les deux principaux outils de désherbage mécanique. En général : effet négatif sur les adventices, leur efficacité peut varier selon l'adventice visée et le climat
Liebman et Dyck, (1993) ; Perspectives agricoles n°381, (2001) ; Arvalis-info (2012) ; Arvalis-cetiom (2013) ; Arvalis CETIOM Infos. (2012)	Désherbage chimique	Période	Traitement en automne Hiver Automne + sortie d'hiver	Le désherbage chimique, s'il est bien employé, constitue un bon moyen de gestion des adventices. L'effet peut varier selon la période d'application et la présence d'adventices résistantes (Effet négatif sur les adventices non résistantes). Les conditions d'humidité du sol peuvent aussi avoir un impact sur l'efficacité du traitement chimique mais cette information ne sera pas forcément présentée dans les jeux de données disponibles.
		Condition de traitement	Absence de traitement sulfurylés selon humidité sol	

Référence Bibliographie	Attribut 1	Attribut 2	Valeur	Effer / Commentaires
Rasmussen, (2004) ; Colbach et al., (2008) ; Chauvel et al., (2007); Lutman et al., (2013) ; Gill et Holmes, (1997) ;Arvalis-infos (2012)	Date de semis		Tardif Normal Précoce	En général un semis tardif permet une bonne gestion des adventices mais peu parfois présenter des inconvénients en cas de mauvaises conditions climatiques.
Norris et al.,(2001) ; Korres et Froud-Williams (2001) ; Murphy et Lemerle, (2006) ; Colbach et al.,(2008) ; Lutman et al., (2013) ; Weiner et al., (2001)	Densité de semis		Elevée Normale Faible	De manière générale, une densité élevée permet de réduire le nombre d'adventices notamment les adventices en rosette. Son efficacité peut diminuer pour les adventices grimpantes.
Blackshaw et al., (2006) ; Korres et Froud-Williams (2001) ; Wicks et al., (1994) ;Munier-Jolain et al., (2008) ; Lutman et al., (2013) ; Fontaine et al., (2011)	Variété	Hauteur Port des feuilles	Grande (>100cm) Moyenne (entre 90 et 100cm) Petite (<90cm) Couvrant Peu-pas couvrant	Même si la taille est le caractère dominant induisant une bonne compétitivité de la variété, le port des feuilles peut aussi jouer un rôle.
Dastgheib et al., (1998) ; Cousens et Mortimer, (1995) ; Haas et Streibig, (1982) ; Liebman et Davis, (2000)	Fertilisation azotée	Dose	Elevée Normale Faible	La fertilisation peut augmenter le développement des adventices , d'autant plus si elles sont nitrophiles.
Barberi , 2002 ; Liebman et Dyck, 1993	Culture associée		Culture seule Associée à légumineuse (luzerne, trèfle, pois)	Tout comme la densité de semis et la compétitivité de la variété de blé, ce facteur entre en compte dans le processus de concurrence/étouffement des adventices.
Blackshaw et al., (2001) ; Seibutis et Develkytė, (2006) ; Colbach et al., (2008) ;Lutman et al., (2013) ;Gill et Holmes, (1997) ; Arvalis-info (2012) ; ITAB (2012 b.) ;Arvalis Infos (2010).	Climat	Impact sur Faux semis Herse étrille en culture		Peu de données sont disponibles sur l'impact global du climat, en revanche il peut avoir un effet sur l'efficacité du faux semis (pluie nécessaire à la germination pendant période de faux semis) et sur celle de la herse étrille (période sèche après passage pour éviter repliquage).
ACTA (2012) ; ITAb (2012 b.)	Eléments paysagers	Entretien des fossés et des abords		Des préconisations concernant l'entretien des fossés et bandes enherbées sont données par les organismes techniques mais peu d'études sont disponibles à ce sujet. De plus ces informations ne seront pas présentes dans les jeux de données utilisés.
Bastiaans et al., (2008) ; Westerman et al. (2003)	Prédation			Avec la germination et la dégradation par les bactéries et les champignons, la prédation est un phénomène qui peut faire diminuer le stock de graines mais elle est difficile à prendre en compte dans notre modèle.
CETIOM (2011-2012); INRA (2009 b.)	Type de sol	Texture	sableux; argilo-sableux; limoneux; argillo-limoneux; argileux...	Les adventices peuvent avoir plus ou moins d'affinité avec certains type de sol. Cela peut donc favoriser ou défavoriser le développement des adventices selon leur sensibilité à la nature du sol.

Annexe 23. Sous arbre « gestion stock semencier »



Tableaux « valeurs »

Nature culture
Céréale moissonnée
AVEC récupérateur de menue paille (Oui /Non ou inconnu)
Autre culture d'hiver

Pouvoir concurrentiel
Fort
Faible

Entretien culture de printemps
Oui en bonnes conditions
non ou oui mais en mauvaises conditions

Entretien culture d'hiver
Oui et efficacité => arbre satellite désherbage)
Non
Climat propice à la levée pendant interculture
Oui (Bonne T°C et pluie)
Non(T°C mauvaise et pas de pluie)

Wsol préc et anté-préc
Labour profond (>20cm)
Labour peu profond (<20cm)
Superficiel/ Non labour AVEC faux semis
Superficiel/ Non labour SANS faux semis
Semis direct

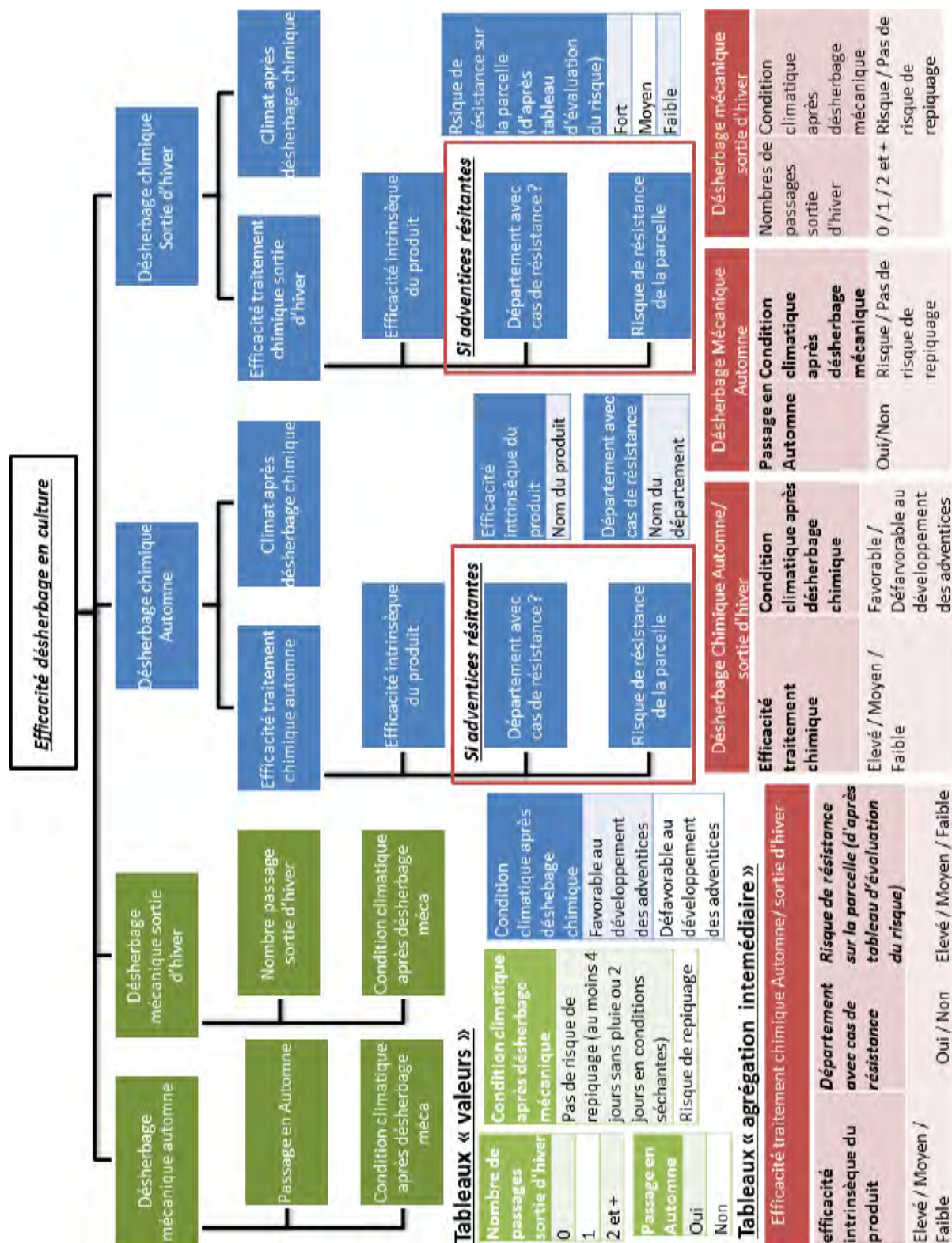
Tableaux « agrégation » des attributs intermédiaires

Culture d'hiver (Risque d'infestation: fort/ moyen/ faible)	
Nature	Entretien
Moissonnée AVEC récupérateur de menue paille (Oui /Non ou inconnu)	Efficacité désherbage
Moissonnée AVEC récupérateur de menue paille (Oui /Non ou inconnu)	Pas de désherbage
Autre culture d'hiver	Efficacité désherbage
Autre culture d'hiver	Pas de désherbage

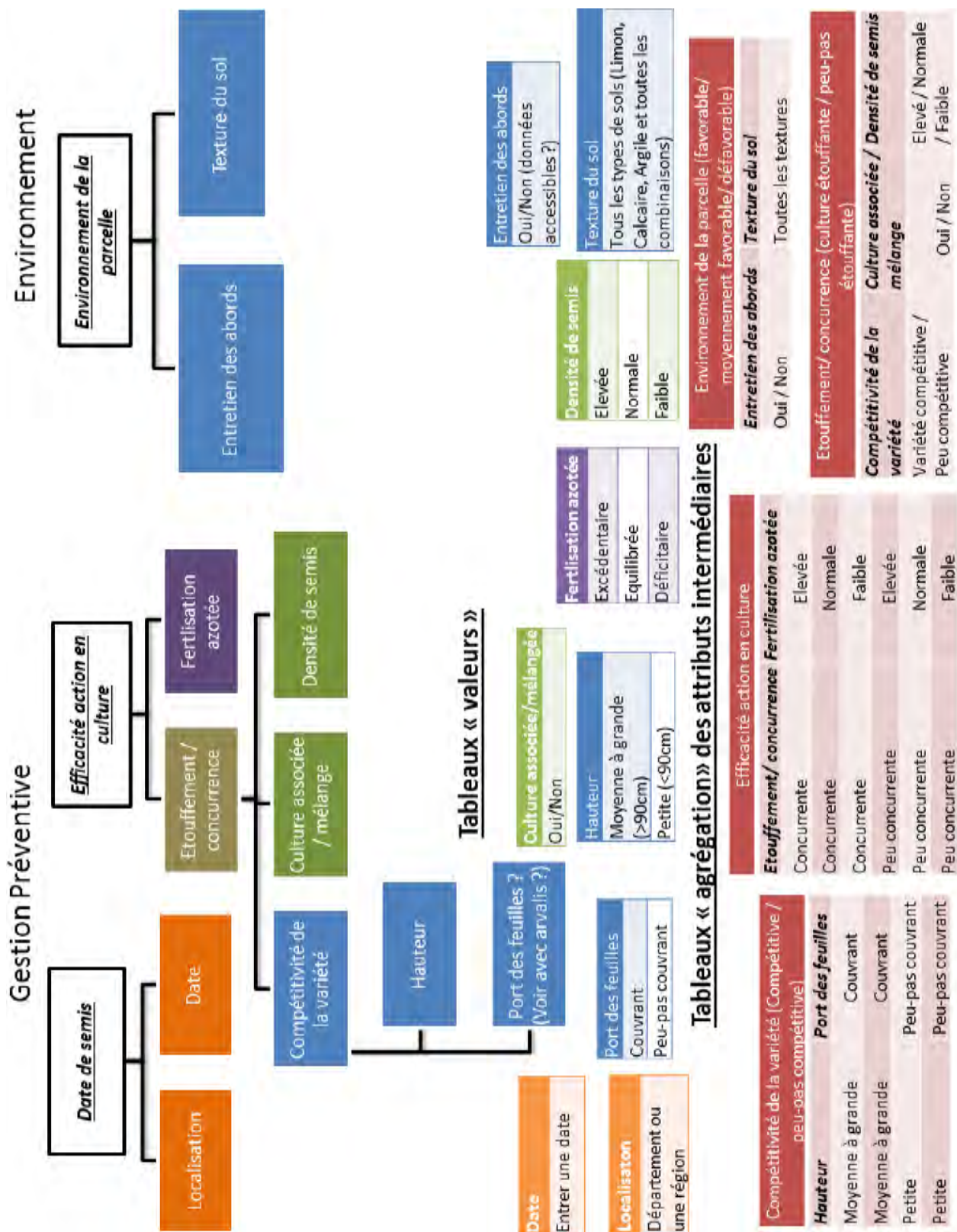
Culture de Printemps (Risque: idem)	
Pouvoir concurrentiel	Entretien (efficacité du programme)
Fort	Oui en bonnes conditions
Fort	Oui en bonnes conditions
Faible	non ou oui mais en mauvaises conditions
Faible	non ou oui mais en mauvaises conditions

Efficacité Wsol préc et anté-préc (Forte / Moyenne/ faible)	
Wsol préc :	Climat propice à la levée pendant interculture:
Labour profond (>20cm);	Oui (Bonne T°C et pluie) ;
Labour peu profond (<20cm);	Non(T°C mauvaise et pas de pluie)
Non labour;	Semis direct
Semis direct	

Annexe 24. Sous arbre « efficacité du désherbage en culture »



Annexe 25. Sous arbres « gestion préventive » et « environnement »



Annexe 26. Exemples de transformation sous Excel de variables quantitatives en variables qualitatives

1	Option	date semis		Espèce	variété	sensibilité RB	densité semis (gr/m²)		fertilisation N (unités)	
2	INRA3510-1	28/10/2009	Normale		ALDRIC	5	150	faible	100	Equilibrée
3	INRA3510-2	28/10/2009	normale	BT	ALIGATOR	7	150	faible	100	Equilibrée
4	INRA3510-3	28/10/2009	normale	BT	ALTIGO	7	150	faible	100	Equilibrée
5	INRA3510-4	28/10/2009	normale	BT	KARILLON	7	150	faible	100	Equilibrée
6	INRA3510-5	28/10/2009	normale	BT	AREZZO	4	150	faible	100	Equilibrée
7	INRA3510-6	28/10/2009	normale	BT	ATTLASS	6	150	faible	100	Equilibrée
8	INRA3510-7	28/10/2009	normale	BT	BAROK	5	150	faible	100	Equilibrée
9	INRA3510-8	28/10/2009	Retardée	BT	BERMUDE	5	150	faible	100	Equilibrée
10	INRA3510-9	28/10/2009	normale	BT	BOREGAR	3	150	faible	100	Equilibrée
11	INRA3510-10	28/10/2009	normale	BT	CAPHORN	6	150	faible	100	Equilibrée
12	INRA3510-11	28/10/2009	normale	BT	FLAMENKO	6	150	faible	100	Equilibrée
13	INRA3510-12	28/10/2009	normale	BT	MUSIK	4	150	faible	100	Equilibrée
14	INRA3510-13	28/10/2009	précoce	BT	GARCIA	3	150	faible	100	Equilibrée
15	INRA3510-14	28/10/2009	normale	BT	GONCOURT	5	150	faible	100	Equilibrée
16	INRA3510-15	28/10/2009	normale	BT	HYSTAR	6	150	faible	100	Equilibrée
17	INRA3510-16	28/10/2009	normale	BT	KORELI	6	150	faible	100	Equilibrée
18	INRA3510-17	28/10/2009	normale	BT	CAPHORN+TRAPEZ+	7	150	faible	100	Equilibrée
19	INRA3510-18	28/10/2009	normale	BT	OAKLEY	8	150	faible	100	Equilibrée
20	INRA3510-19	28/10/2009	normale	BT	OXEBO	7	150	faible	100	Equilibrée
21	INRA3510-20	28/10/2009	normale	BT	PREMIO	6	150	faible	100	Equilibrée
22	INRA3510-21	28/10/2009	normale	BT	FOLKLOR	6	150	faible	100	Equilibrée
23	INRA3510-22	28/10/2009	normale	BT	RUSTIC	7	150	faible	100	Equilibrée
24	INRA3510-23	28/10/2009	normale	BT	SOLEHIO	5	150	faible	100	Equilibrée
25	INRA3510-24	28/10/2009	normale	BT	TRAPEZ	7	150	faible	100	Equilibrée

Exemple d'une feuille de saisie de données d'entrée sous Excel avec transformation des variables quantitatives en variables qualitatives.

2										
3										
4			date semis BT:							
5			région	type de précocité		date opti semis	précoce avant cet intervalle	tardif après		
6	alsace		1	aubusson		20/10au10/11				
7				altigo,soissons, trémie		10/10au10/11				
8				alixan,caphorn,premio,orvantis		5/10au1/11				
9				apache,euclide		5/10au10/11				
10				toisonдор		5/10au20/10				
11	bretagne-pays de loire		3(PDL)	bermude,sankara,koreli		5/10au10/10				
12				Toisonдор		10/10au20/10				
13				alixan,premio;apache,caphorn,euclide		10au30/10				
14				soissons,altigo,arezzo		15 au30/10				
15				aubusson		20/10au5/11				
16				nogal		25/10au10/11				
17			3B	toisonдор, bermude,expert		10/10au20/10				
18				apache,caphorn,euclide		20/10au5/11				
19				soissons,arezzo		25/10au5/11				
20				nogal		1/11au15/11				

Exemple d'un tableur sous Excel permettant la transformation de la variable quantitative exprimée en jour calendaire, « date de semis », en variable qualitative (précoce/normale/retardée)

RESUME

La protection intégrée des cultures (PIC) apparaît comme une stratégie durable de protection des plantes contre les bioagresseurs, satisfaisant les exigences à la fois économiques, écologiques et sanitaires auxquelles est confrontée l'agriculture. L'amélioration des connaissances sur les interactions entre les bioagresseurs et les pratiques agricoles est indispensable afin de concevoir des méthodes de lutte plus économes en produits phytosanitaires

Le modèle IPSIM (Injury Profile SIMulator), développé dans ce travail de thèse, vise à simuler l'effet des pratiques culturales, du pédoclimat et de l'environnement de la parcelle sur les dégâts causés par les bioagresseurs sur une culture. Ce modèle est basé sur une approche hiérarchique et agrégative. Ce travail décrit la base conceptuelle de la modélisation IPSIM et son application pour construire le modèle IPSIM-Wheat, simulant les profils de dégâts sur le blé en fonction des pratiques culturales et de l'environnement biotique et abiotique. Plusieurs modèles ont été conçus pour prédire les sévérités de six maladies, un ravageur et les plantes adventices du blé. Ces modèles contribuent ainsi au développement d'IPSIM-Wheat, dont une première version est présentée pour des bioagresseurs majeurs en interaction. Ce futur modèle pourra contribuer à concevoir des systèmes de culture incluant du blé, moins soumis aux pressions biotiques et moins dépendants des pesticides.

Mots clefs : blé, bioagresseurs, modélisation, pratiques culturales, profil de dégâts, Protection Intégrée des Cultures, situation de production

ABSTRACT

Integrated pest management (IPM) appears as a sustainable strategy to protect plants against pest while answering the economical, ecological, and toxicological expectations that agriculture must face. The effects of cultural practices on pest dynamics have to be thoroughly analyzed in order to reduce the reliance of cropping systems on pesticides. A model, named IPSIM ((Injury Profile SIMulator), currently under development in this thesis, aims at simulating the effects of cropping practices, as well as soil, climate and field environment on the injuries caused by multiple pests of a given crop. This model is based on a hierarchical and aggregative approach. This study describes the conceptual basis of the modeling and its applications in order to develop IPSIM-Wheat, a model simulating injury profiles on wheat. Thus, several models have been designed to predict six diseases, one insect pest and weeds. This study thus contributes to the development of IPSIM-Wheat which will help design innovative sustainable wheat-based cropping system.

Key words: wheat, pests, modelling, cropping practices, injury profile, Integrated Crop Management, production situation.