THÈSE

Pour l'obtention du grade de
DOCTEUR DE L'UNIVERSITÉ DE POITIERS
UFR des sciences fondamentales et appliquées
Institut national de la recherche agronomique (France)
(Diplôme National - Arrêté du 25 mai 2016)

École doctorale : Sciences pour l'environnement - Gay Lussac (La Rochelle)
Secteur de recherche : Biologie de l'environnement, des populations, écologie

Présentée par :
Nicolas Urruty

Robustesse du rendement du blé tendre face aux perturbations abiotiques et biotiques : cadre méthodologique et leviers agronomiques

Directeur(s) de Thèse :
Christian Huyghe

Soutenue le 31 janvier 2017 devant le jury

Jury :

Président	**Frédéric Grandjean**	Professeur des Universités, Université de Poitiers
Rapporteur	**Bernard Bodson**	Professeur, Université de Liège
Rapporteur	**Nicolas Munier-Jolain**	Ingénieur de recherche, INRA de Dijon
Membre	**Christian Huyghe**	Directeur de recherche, INRA de Lusignan
Membre	**Philippe Leterme**	Professeur émérite, Agrocampus Ouest
Membre	**Lilia Levy-Häner**	Ingénieur de recherche, Agroscope, Suisse
Membre	**Delphine Tailliez-Lefebvre**	Ingénieur de recherche, Agrosolutions, Paris

Pour citer cette thèse :
Nicolas Urruty. *Robustesse du rendement du blé tendre face aux perturbations abiotiques et biotiques : cadre méthodologique et leviers agronomiques* [En ligne]. Thèse Biologie de l'environnement, des populations, écologie. Poitiers : Université de Poitiers, 2017. Disponible sur Internet <http://theses.univ-poitiers.fr>

THESE

pour l'obtention du Grade de
DOCTEUR DE L'UNIVERSITE DE POITIERS
(Faculté des Sciences Fondamentales et Appliquées)
(Diplôme National - Arrêté du 25 mai 2016)

Ecole Doctorale : Gay Lussac

Secteur de Recherche : Biologie de l'environnement, des populations, écologie

Présentée par :

Nicolas URRUTY

****

Robustesse du rendement du blé tendre face aux perturbations abiotiques et biotiques : cadre méthodologique et leviers agronomiques

****

Directeur de Thèse : Christian HUYGHE

****

Soutenue le 31 janvier 2017

devant la Commission d'Examen

****

JURY

M. Bernard BODSON	Professeur, Université de Liège	Rapporteur
M. Nicolas MUNIER-JOLAIN	Ingénieur de recherche, INRA	Rapporteur
M. Philippe LETERME	Professeur émérite, AgroCampus Ouest	Examinateur
Mme. Lilia LEVY-HÄNER	Ingénieur de recherche, Agroscope	Examinatrice
M. Frédéric GRANDJEAN	Professeur, Université de Poitiers	Examinateur
M. Christian HUYGHE	Directeur de recherche, INRA	Directeur de thèse
Mme. Delphine TAILLIEZ-LEFEBVRE	Ingénieur de recherche, Agrosolutions	Encadrante

“Nous devons commencer à comprendre nos relations avec nos semblables, avec la nature, avec les idées et les objets, car, sans cette compréhension, il n'y a pas d'espoir, il n'y a pas d'issue aux conflits et aux misères”

Jiddu Krishnamurti

Remerciements

Le moment tant attendu : l'heure des remerciements… Bien avant que je démarre ma thèse, on m'avait déjà parlé de ce moment comme le sommet intellectuel de ma carrière de chercheur. Le texte qui sera le plus lu, le plus commenté, peut-être le plus débattu ! Mais au risque de décevoir mes lecteurs, je ne vais pas faire dans l'originalité. Car au bout de trois ans et un sprint final qui s'est transformé en ultra-trail, je ne crois pas que ce soit le moment de se remettre à la poésie et aux alexandrins.

Néanmoins, plusieurs personnes méritent mes remerciements les plus sincères. Avant tout Christian et Hervé pour m'avoir donné la chance de m'épanouir à l'INRA et de m'avoir accompagné tout au long de ce travail de thèse. A la fois exigeants et passionnants, ils m'ont transmis les fondements de la démarche scientifique. Je dois également remercier Jean-Louis, Bernard, Martine, Muriel, Corinne et Juliette, membres de la « déesse » agriculture, qui m'ont apporté leur amitié et leur soutien à de nombreuses reprises. J'ai également une pensée pour Valérie qui nous a tristement quittés trop tôt.

Je remercie chaleureusement les différents membres du jury qui m'ont fait l'honneur d'évaluer mon travail. En particulier, messieurs Bodson et Munier-Jolain qui ont accepté d'être les rapporteurs de cette thèse. Je remercie également les différents membres de mon comité de thèse dont l'aide fut précieuse tout au long de ce projet : Jean Boiffin, Philippe Gate, Xavier Pinochet, Philippe Debaeke et Delphine Tailliez-Lefebvre.

Un grand merci à Agrosolutions pour avoir financé en partie cette thèse. J'envoie des remerciements plus personnels à Damien Valour, Axel Olivier, Catherine Golden, Simon Lefebvre, Guillaume Py et Martin Lechenet pour leur aide et leur dynamisme.

Merci à l'Université de Poitiers et à la COMUE Léonard de Vinci pour son soutien dans l'aventure MT180. Mes remerciements les plus appuyés à François Baty-Sorel pour son rayonnement humain et ses paroles toujours précieuses.

Enfin, des remerciements plus personnels à mes amis et collègues : Thomas qui a toujours cru dans ma thèse (!) et le gang des CDD : Fiona, Alix, Maud, Suzanne et Alexis. Merci aussi à Tanguy qui fut mon premier stagiaire et avec qui j'ai eu le plaisir de partager mes activités de recherche. Merci à Greg et Océane pour leur amitié, aux anciens de l'ENSAT et de l'IUT de Auch que je n'oublie pas.

Merci à mon frère, LaBuzasse, pour l'exemple. Merci à Marie-Brigitte et Olivier pour leur soutien. Merci à mes parents pour leur confiance et leur amour. Et enfin, *last but not least*, merci à Charlène qui m'a soutenu pendant trois ans, supporté depuis encore plus longtemps et qui m'aide chaque jour à être la meilleure version de moi-même.

Liste des articles et communications réalisés dans le cadre de la thèse

Articles dans des revues scientifiques avec comité de lecture international

Urruty, N., Tailliez-Lefebvre, D., Huyghe, C., 2016. Stability, robustness, vulnerability and resilience of agricultural systems. A review. Agronomy for Sustainable Development 36, 1-15.

Urruty, N., Deveaud, T., Guyomard, H., Boiffin, J., 2016. Impacts of agricultural land use changes on pesticide use in French agriculture. European Journal of Agronomy 80, 113-123.

Urruty, N., Guyomard, H., Tailliez-Lefebvre, D., Huyghe, C., soumis à European Journal of Agronomy. Designing high yielding and robust wheat crops: 1- Characterization and quantification of abiotic and biotic perturbations on wheat growth and yield.

Urruty, N., Guyomard, H., Tailliez-Lefebvre, D., Huyghe, C., soumis à European Journal of Agronomy. Designing high yielding and robust wheat crops: 2- Characterization and quantification of abiotic and biotic perturbations on wheat growth and yield. Characterization and assessment of yield robustness to abiotic perturbations.

Urruty, N., Guyomard, H., Tailliez-Lefebvre, D., Huyghe, C., soumis à Field Crops Research. Assessment of wheat yield performances under average and changing weather conditions.

Communications avec actes dans un congrès international ou national

Urruty, N., Huyghe, C., Chansiaux, C., Gate, P. 2015. Quantification des niveaux de stress abiotiques avec le modèle de culture STICS : une première étape dans l'évaluation de la robustesse des systèmes agricoles. Actes du Ier séminaire du réseau scientifique STICS, 24-26 mars 2015, Rennes, France. 95-96.

Urruty, N., Huyghe, C., Tailliez-Lefebvre, D., Gate, P. 2015. Characterization and quantification of robustness for designing more sustainable and robust wheat productions. Proceedings of the 5th International Symposium for farming Systems Design, 7-10 septembre 2015, Montpellier, France. 47-48.

Urruty, N., Guyomard, H., Tailliez-Lefebvre, D., Huyghe, C. 2016. Characterization and assessment of yield robustness in French wheat cropping systems. Proceedings of the 14th ESA Congress, 5-9 septembre 2016, Edinburgh, Ecosse. 7-8.

Urruty, N., Tailliez-Lefebvre, D., Huyghe, C. 2016. Characterization and quantification of the impacts of abiotic perturbations on wheat yield. Proceedings of the 14th ESA Congress, 5-9 septembre 2016, Edinburgh, Ecosse. 13-14.

Articles dans des revues sans comité de lecture

Urruty, N., Deveaud, T., Guyomard, H., Boiffin, J., 2016. Usage des pesticides en agriculture: effets des changements d'usage des sols sur les variations de l'indicateur NODU. Notes et études socio-économiques 39, 165-185.

Urruty, N., 2016. L'agriculture face à un contexte d'incertitude croissant : plus de diversité pour des systèmes de production plus robustes ? Watch Letter (CIHEAM) 37, 165-169.

Articles de presse et communications public professionnel

Urruty, N., 2016. Impacts de la réduction des pesticides sur le rendement du blé. Nuit de l'agro-écologie, 23 juin 2016, Ministère de l'agriculture, Paris, France.

Urruty, N., 2016. De nouvelles pistes pour concilier diminution de l'usage de pesticides et performance en rendements ? Agriculture et Nouvelles Technologies, 14 octobre 2016

Communications grand public

Concours MT180. Finale universitaire de Poitiers. 2ème prix du jury, 31 mars 2016, Poitiers, France.

Concours MT180. Finale inter-universitaire de la COMUE Léonard de Vinci. 1er prix du jury, 26 avril 2016, Limoges, France.

Concours MT180. Finale nationale. 3ème prix du jury, 31 mai 2016, Bordeaux, France.

Concours MT180. Finale internationale. 3ème prix du jury, 29 septembre 2016, Rabat, Maroc.

Table des matières

INTRODUCTION **19**

I. Positionnement de la thèse **21**

II. Contexte et défis liés à la production de blé tendre en France **23**

II.1. Géographie et géoéconomie du blé tendre 23

II.2. Un défi majeur : le changement climatique 26

II.3. Une attente forte : la réduction de l'usage des pesticides 28

III. Problématique de la thèse **30**

IV. Démarche et organisation **31**

V. Références **32**

SECTION 1 : LA ROBUSTESSE, DU CONCEPT A LA MISE EN PRATIQUE SUR UN LARGE RESEAU DE PARCELLES DE BLE TENDRE **37**

Chapitre 1 : Revue de la littérature sur les concepts de stabilité, robustesse, vulnérabilité et résilience **39**

I. Introduction **40**

II. Agricultural systems facing a more changeable environment **42**

II.1. Agricultural systems 42

II.2. A more changeable environment 42

III. Conceptual frameworks **44**

III.1. The Concept of Stability 46

III.2. The Concept of Robustness 46

III.3. The Concept of Vulnerability 48

III.4. The Concept of Resilience 49

IV. From concepts to assessment in agricultural systems **51**

IV.1. Variability of agricultural outputs 51

IV.2. Relationship between agricultural outputs and perturbations 52

IV.3. Multiscale and adaptive capacity assessment of agricultural systems 53

V. Key levers for improving the ability of agricultural systems to cope with perturbations **54**

V.1. Increasing diversity at different levels 54

V.2. Increasing the adaptive capacity of agricultural systems 55

VI. Conclusion 56

VII. References 56

Chapitre 2 : Le concept de la robustesse appliqué à un large réseau de parcelles de blé tendre, présentation des données d'enquêtes mobilisées63

I. Le réseau DEPHY 64

II. Présentation du sous-réseau FERMEcophyto 65

SECTION 2 : ANALYSE DE LA ROBUSTESSE DU RENDEMENT DU BLE TENDRE FACE AUX PERTURBATIONS ABIOTIQUES 71

Chapitre 3 : Caractérisation et quantification des perturbations abiotiques sur le rendement du blé tendre 73

I. Introduction 74

II. Materials and methods 76

II.1. Data 76

II.2. Characterization of abiotic limiting factors of wheat (step 1) 77

II.3. Classification of the main wheat-producing environments (step 2) 79

II.4. Simulation of wheat yields over the period 1983-2014 (step 3) 79

II.5. Index of abiotic perturbations (step 4) 80

III. Results 81

III.1. Abiotic limiting factors 81

III.2. Six wheat-producing environments 84

III.3. Yield simulations through the STICS crop model 86

III.4. Quantification of the ABIO index 88

IV. Discussion 92

V. Conclusion 95

VI. Acknowledgments 95

VII. References 95

Chapitre 4 : Caractérisation et évaluation de la robustesse du rendement du blé tendre face à des perturbations abiotiques 99

I. Introduction 101

II. Materials and methods 102

II.1. Data 102

II.2. Characterizing wheat yield robustness to abiotic perturbations 105
II.3. Four patterns of wheat yield robustness 105
II.4. Agronomic characterization of the four quadrants and identification of the main drivers of robustness 106

III. Results 107

IV. Discussion and conclusion 111

V. References 115

Chapitre 5 : Analyse de la diversité des systèmes de culture et évaluation de la robustesse du rendement du blé tendre face à des perturbations abiotiques 117

I. Introduction 118

II. Materials and methods 120

II.1. Data 120
II.2. Defining a typology for French wheat cropping systems 120
II.3. Assessing wheat yield performances for the different clusters of the full typology 123

III. Results 124

III.1. The typology 124
III.2. Yield performances 128

IV. Discussion 131

V. Conclusion 134

VI. References 135

SECTION 3 : ANALYSE DE LA ROBUSTESSE DES PERFORMANCES DU BLE TENDRE FACE AUX PERTURBATIONS BIOTIQUES 139

Chapitre 6 : Robustesse des systèmes de culture face aux perturbations biotiques, le cas de l'utilisation des fongicides sur le blé tendre face à des niveaux contrastés de pression maladies 141

I. Introduction 142

II. Materials and methods 143

II.1. Data 143
II.2. The index of fungal pressure 144
II.3. Assessing the robustness of cropping systems to fungal pressure 146
II.4. Characterizing agronomic drivers of robustness of cropping systems to fungal pressure 146

III. Results **149**
III.1. The fungal pressure index 149
III.2. Assessment of robustness to fungal pressure 150
IV. Discussion and conclusion **156**
IV.1. The fungal pressure index 157
IV.2. Assessment of robustness to fungal pressure 158
V. Conclusion **161**
VI. References **162**
DISCUSSION GENERALE **165**
I. Le concept de robustesse **167**
I.1. Les apports conceptuels 167
I.2. Les conditions d'opérationnalité du concept de robustesse 168
I.3. Liens entre robustesse et performance moyenne 169
II. Le cadre d'évaluation de la robustesse **170**
II.1. Robustesse du rendement face aux perturbations abiotiques 170
II.2. Robustesse de l'IFT fongicides face aux perturbations biotiques 175
II.3. Quelles perspectives pour ce cadre méthodologique de la robustesse ? 179
III. Apports opérationnels de la thèse **185**
III.1. Intégrer plus de flexibilité dans les systèmes agricoles 186
III.2. Conséquences pour les acteurs du développement agricole 187
III.3. Autres mécanismes de gestion du risque en agriculture 188
IV. Atouts et limites associés aux dispositifs de recherche participative **189**
IV.1. Le réseau participatif DEPHY-FERME 189
IV.2. Un accélérateur de diffusion des pratiques ? 190
IV.3. La recherche participative à l'ère du Big Data 190
V. Références **191**
CONCLUSION **197**
ANNEXES **201**

Table des figures

Figure 1 : Carte des rendements moyens du blé tendre par hectare observés dans le monde (Monfreda et al., 2008) 24

Figure 2 : Distribution par département des surfaces de blé tendre en milliers d'hectares en 2013 (Source : Agreste, 2013) 25

Figure 3 : Anomalies annuelles et décennales des températures moyennes de surface sur la période 1850-2012 (a) et variation de la température de surface observée sur la période 1901-2012 (b) (Source : IPCC, 2014) 26

Figure 4 : Rendements moyens du blé tendre en France sur la période 1980-2016 (Agreste, 2016) . 27

Figure 5 : Schéma d'organisation de la thèse : progression et articulation des chapitres, et matériels et méthodes mobilisés pour les traiter 32

Figure 6 : Agricultural systems are facing multiple and unpredictable perturbations. The impact on a sunflower field of salted sea water flooding induced by Xynthia storm in 2010, in Rochefort area (France). Photo credit: INRA 42

Figure 7 : Illustration of stability, robustness, vulnerability and resilience concepts (adapted from Mumby et al. (2014) and de Goede et al. (2013)). 47

Figure 8 : Localisation des exploitations agricoles engagées dans le réseau DEPHY-FERMES en août 2016 (Source : Cellule d'Animation Nationale du réseau DEPHY) 65

Figure 9 : Carte des principales coopératives adhérentes au groupe InVivo et engagées dans le cadre du sous-réseau FERMEcophyto 66

Figure 10 : Répartition des 145 exploitations issues du réseau FERMEcophyto et mobilisées pour la thèse 68

Figure 11 : Localisation des 145 exploitations sélectionnées au sein du sous-réseau FERMEcophyto 68

Figure 12 : The four steps of the method and materials used to develop the index of abiotic perturbations 76

Figure 13 : Number of growing degree days (GDD) used to predict wheat phenological phases (based on Gate, 1995) 77

Figure 14 : Average water deficit indicators calculated over the period 1983-2014 and five phenological phases. For example, the first map shows the average sum of daily water deficit (in mm) between sowing and emergence of wheat 81

Figure 15 : Average water excess indicators calculated over the period 1983-2014 and two phenological phases. For example, the first map shows the average number of days with total rainfall above 30 mm between sowing and emergence of wheat 82

Figure 16 : Average frost indicators calculated over the period 1983-2014 and four phenological phases. For example, the first map shows the average number of days with minimum temperature below -8°C between emergence and ear at 1cm of wheat 82

Figure 17 : Average heat indicators calculated over the period 1983-2014 and two phenological phases. For example, the first map shows the average number of days with aximum temperature above 30°C between meiosis and flowering of wheat 83

Figure 18 : Average radiation deficit indicators calculated over the period 1983-2014 and two phenological phases. For example, the first map shows the average daily solar radiation around meiosis (five days prior and after it) 83

Figure 19 : Six wheat-producing environments across the 145 farms of the FERMEcophyto network 84

Figure 20 : Cumulative percentage of soil types based on water reserve groups among the 2,327 parcels distributed in the six wheat-producing environments 86

Figure 21 : Temporal variability of simulated yield (in t/ha) over the period 1983-2014 in the six wheat-producing environments 87

Figure 22 : Geographical distribution of the average ABIO index across the full set of farms and over the period 1983-2014 89

Figure 23 : Temporal variability of ABIO index in the six wheat-producing environments over the period 1983-2014 90

Figure 24 : Distribution curve of the ABIO index in the six wheat-producing environments over the period 1983-2014 and results between the years 2011 and 2014 94

Figure 25 : Geographical distribution of the 145 farms in six geographic regions 103

Figure 26 : Wheat yield in average weather conditions (y axis) and wheat yield sensitivity to abiotic perturbations (x axis). For each cropping system, the two criteria are calculated with respect to the mean of the geographical zone A to F to which the cropping 108

Figure 27 : Defining a wheat cropping system as a combination of crop rotation and wheat management practices.....120

Figure 28 : Geographical distribution of the six clusters in the full typology.....128

Figure 29 : Mean and standard deviation of yield performances within each of the six clusters 133

Figure 30 : Description of the spatial interpolation method: the value of territory T is estimated from known values of sites A, B and C (Cartes&Données, 2015) 145

Figure 31 : Regression of cross validation results on FP index values over the 186 trial locations and over the period 2011-2014 149

Figure 32 : Spatial distribution of FP index after geographical interpolation over the period 2011-2014 150

Figure 33 : The 120 cropping systems distributed across four patterns of fungicide performances .151

Figure 34 : Mean and standard deviation of fungicide performances within each of the six clusters 157

Figure 35 : Linear regression of FP index according to ABIO index over the 120 farms and over the period 2011-2014 158

Table des tableaux

Table 1 : Summary of the main differences between the concepts of stability, robustness, vulnerability and resilience 45

Tableau 2 : Liste des variables documentées dans le réseau FERMEcophyto 67

Table 3 : Agro-climatic indicators used to characterize the main abiotic limiting factors across the 145 farms..... 78

Table 4 : Parametrization of the STICS crop model for the 145 farms..... 80

Table 5 : Average intensities of the 15 agro-climatic indicators calculated in each wheat-producing environment 85

Table 6 : Average wheat management practices used to parametrize STICS crop model in the six wheat-producing environments 87

Table 7 : Average observed and simulated wheat yields (in t/ha) over the period 2011-2014 in the six wheat-producing environments 88

Table 8 : Average ABIO indexes calculated over the period 1983-2014 in the six wheat-producing environments 89

Table 9 : Average ABIO index calculated over the three periods 1983-93, 1994-2004 and 2005-2014 and annual growth rate of the index over the whole period 1983-2014 in the six wheat-producing environments 91

Table 10 : Results of Student's t-tests used to assess whether the inter-annual variability of the ABIO index has increased in the six wheat-producing environments over the period 1983-2014 91

Table 11 : Characterization of wheat cropping systems using three groups of agronomic practices 104

Table 12 : Four patterns of wheat yield robustness 106

Table 13 : Average yield and average yield sensitivity for each pattern of yield robustness 107

Table 14 : Average relative values of agronomic practices in the four quadrants (values in brackets are empirical standard deviations calculated for each quadrant) 109

Table 15 : Results of Wilcoxon signed-rank tests used to compare agricultural practices between cropping systems (*** significant at P<0.01, ** significant at P<0.05, * significant at P<0.10, and NS for not significant).....110

Table 16 : Agronomic practices differentiating robust versus sensitive cropping systems 113

Table 17 : Variables used to describe rotation practices and construct the first typology 121

Table 18 : Variables used to describe the wheat management practices and construct the second typology 122

Table 19 : Rotation characteristics for the two clusters of the first typology, defined from rotation practices 124

Table 20 : Management practice characteristics in the three clusters of the second typology, defined from management practices 125

Table 21 : Rotation and wheat management practices in the six clusters of the full typology 127

Table 22 : Mean wheat yields under average weather conditions and pair-wise comparisons among the six clusters 129

Table 23 : Mean wheat yield robustness to abiotic perturbations and pair-wise comparisons among the six clusters 130

Table 24 : Number of Apache variety trials derived from the Semences-de-France network over the period 2011-2014 144

Table 25 : Four patterns of fungicide use robustness 147

Table 26 : Characterization of wheat cropping systems using three groups of agronomic practices 147

Table 27 : Fungicide performances of the four patterns 151

Table 28 : Average relative values of agronomic practices in the four quadrants (values in brackets are empirical standard deviations calculated for each quadrant) 152

Table 29 : Results of Wilcoxon signed-rank tests used to compare agricultural practices between cropping systems distributed in four quadrants (*** significant at P<0.01, ** significant at P<0.05, * significant at P<0.10, and NS for not significant) 153

Table 30 : TFI under average fungal pressure and pair-wise comparisons among the six clusters...155

Table 31 : TFI sensitivity to fungal pressure and pair-wise comparisons among the different clusters 155

Tableau 32 : Rendement et robustesse du rendement face aux perturbations abiotiques pour les 120 systèmes de culture différenciés selon leur niveau de sensibilité de l'IFT face à l'indicateur de pression maladie 179

Tableau 33 : Comparaison des pratiques culturales et des rendements observés dans le réseau FERMEcophyto sur la période 2011-2014 et dans l'enquête Pratiques Culturales de 2011 (données Agreste) 181

Tableau 34 : Rendement et robustesse du rendement face aux perturbations parmi les systèmes de culture différenciés selon leur niveau de performance économique.....184

INTRODUCTION

L'agriculture fait face à des défis majeurs du fait du changement climatique, de l'augmentation de la population mondiale, des transitions alimentaires vers plus de produits carnés et de la raréfaction des ressources naturelles. Ces nombreux défis s'ajoutent aux limites environnementales et sociales des systèmes agricoles actuels et font peser le sentiment que notre monde change à grande vitesse en ce début de 21ème siècle. Dans ce contexte, il n'est pas étonnant que les termes de résilience, vulnérabilité, robustesse ont, dès le milieu des années 2000, commencé à sortir de la sphère des laboratoires d'écologie et ont fait leur apparition sur d'autres terrains, y compris dans les agendas politiques (Dron, 2013). A travers ces concepts, ce sont des questions cruciales qui sont posées aux collectivités humaines. Nos écosystèmes agricoles et forestiers seront-ils capables de résister et de s'adapter aux futures conditions climatiques (Dorin *et al.*, 2010 ; de Lattre-Gasquet *et al.*, 2016) ? Nos infrastructures doivent-elles être reconfigurées, modifiées, adaptées pour être capables de fonctionner dans les prochaines décennies ? Il se précise à travers ces interrogations et ces craintes que nous avons peut-être négligé la question de la robustesse en agriculture pour nous focaliser trop exclusivement sur celles des performances moyennes.

I. Positionnement de la thèse

Cette thèse s'inscrit en agronomie et vise à étudier la robustesse des systèmes de culture, c'est-à-dire leurs performances face à un environnement changeant. C'est une problématique d'autant plus urgente à traiter que le développement agricole en France s'est historiquement organisé dans une optique de maximisation des performances moyennes, d'abord en termes de rendement puis de performances économiques. L'après-guerre a notamment été marqué par un objectif d'augmentation des niveaux de productivité par unité de surface et/ou de travail afin de nourrir une population croissante (Mazoyer and Roudart, 2002). Les avancées industrielles et les travaux des agronomes ont permis aux agriculteurs de développer des systèmes de production très productifs grâce à l'usage croissant de la fertilisation, l'amélioration des variétés, la motorisation, la mécanisation, l'usage des pesticides et les aménagements fonciers (irrigation et drainage).

Ce modèle de production agricole, souvent qualifié d'intensif, présentait dans le contexte de cette époque une grande cohérence car, face à chaque problème, une solution technologique était proposée (Papy and Goldringer, 2011). La fragilisation des plantes et les risques de verse liés à l'utilisation abondante d'engrais azotés ont été résolus par la sélection de nouvelles variétés à paille courte (Evans and Fischer, 1999) et l'usage de régulateurs de croissance. Le problème de la concurrence des cultures de rente avec les adventices, les maladies et les ravageurs a été résolu à travers l'utilisation d'herbicides sélectifs, de fongicides et d'insecticides. La mécanisation et la motorisation, et plus récemment le développement des systèmes de guidage par Géo-Positionnement par Satellite (GPS), ont permis l'agrandissement des tailles des parcelles et des exploitations, et la simplification de nombreuses opérations, de la préparation du sol à la récolte. Enfin, les problèmes d'hydromorphie et d'anoxie des cultures ont été résolus par le drainage.

Progressivement, ces nouveaux outils et ces nouvelles pratiques ont permis aux agriculteurs de se dispenser de cultiver une diversité intra- et interspécifique : les cultures annuelles ont été dissociées des activités d'élevage et des cultures fourragères (l'apport de fumier n'étant plus indispensable sur les cultures annuelles), les rotations ont été simplifiées et raccourcies, parfois jusqu'à la monoculture, et l'expression des potentiels génétiques d'un petit nombre de variétés a été maximisée grâce au « contrôle » des facteurs biophysiques du milieu. On parle ainsi d'une agriculture qui s'est modernisée sous le *paradigme du contrôle* (Tichit, 2014).

Ce modèle agricole présente de nombreuses limites environnementales, de mieux en mieux connues et documentées, sur les quatre composantes de l'environnement (eau, air, sol, biodiversité). La qualité des eaux continentales a été très négativement impactée par les pollutions diffuses de nitrate, de pesticides et de résidus médicamenteux, induites par un recours aux intrants chimiques qui dépasse régulièrement les capacités d'absorption du milieu biophysique (MEDDE, 2014). Au titre de la qualité de l'air, l'agriculture est la seconde source d'émissions de gaz à effet de serre à l'échelle de la France (Pellerin *et al.*, 2015). Les sols sont exposés à des risques d'érosion et de compactage (Gis Sol, 2011). Enfin, la biodiversité intra- et interspécifique est négativement impactée par l'usage continu des pesticides et la spécialisation des territoires et des paysages (MEDDE, 2014).

Ce constat n'est pas récent et a été à l'origine de nombreuses initiatives dont la plus emblématique est celle du *développement durable*. Née avec les travaux du Club de Rome (Meadows *et al.*, 1972) puis institutionnalisée avec le rapport Brundtland (ONU, 1987), la notion de développement durable a progressivement été appliquée à l'ensemble des activités humaines. A partir des années 1990, les instituts de recherche en agronomie réorientent leurs priorités en définissant la durabilité des systèmes agricoles aux trois titres de l'économie, de l'environnement et du social (Godard and Hubert, 2002). De nombreux indicateurs et méthodes d'évaluation, telles que IDEA (Vilain, 2008) et MASC (Craheix *et al.*, 2012), ont été développés permettant de mieux prendre en considération l'impact des activités agricoles sur les trois composantes de la durabilité. A partir des années 2000, avec la mise au premier plan de la question du réchauffement climatique et de la volatilité des marchés et des prix agricoles, ce cadre d'analyse de la durabilité est néanmoins questionné. Comment prendre en compte, au-delà de la question de la durabilité, la capacité des systèmes agricoles à s'adapter, à résister à de nouvelles conditions climatiques ou économiques ? Comment évaluer les performances d'un système agricole face à un environnement changeant ? Dorénavant, il ne s'agit plus de mesurer la performance moyenne dans un environnement stable et contrôlé mais d'évaluer la robustesse de cette performance, notamment lorsque des changements du milieu apparaissent (Darnhofer *et al.*, 2010; Guyomard *et al.*, 2013). Certains auteurs ont ainsi plaidé pour un nouveau *paradigme*, celui *de la robustesse* (ten Napel *et al.*, 2006).

Ce nouveau paradigme de la robustesse replace les systèmes agricoles dans un environnement changeant, où les conditions climatiques et économiques fluctuent, où des crises peuvent survenir. Il s'agit dès lors d'améliorer la capacité des systèmes agricoles à résister à ces perturbations de nature et d'intensité variées et de les aider à s'adapter à ces nouvelles conditions pour tirer parti d'éventuelles opportunités (ten Napel *et al.*, 2011; de Goede *et al.*, 2013). Pour autant, les questions associées à la performance moyenne et à la durabilité des systèmes agricoles ne sont pas abandonnées : elles sont replacées dans un cadre moins figé. Ce concept de la robustesse a été notamment utilisé dans les systèmes d'élevage pour étudier leurs performances face à des variations du milieu biophysique ou socio-économique. Plusieurs travaux récents ont permis d'améliorer son utilisation à l'échelle de l'animal et du troupeau (Blanc *et al.*, 2013; Ollion, 2015).

Les agronomes, en revanche, ont peu étudié ce concept et ne l'ont pas appliqué au cas des systèmes de grande culture, pourtant soumis à une variabilité interannuelle des conditions climatiques et économiques. Cette thèse vise donc à approfondir nos connaissances sur ce concept et à juger de sa pertinence pour évaluer les performances des systèmes de grandes cultures dans un environnement changeant. Plus particulièrement, nous approfondirons cette question sur le cas du blé tendre qui représente la principale espèce annuelle cultivée en France et qui est soumise à de nombreuses perturbations au cours de son développement.

C'est dans cette perspective que cette thèse s'interroge sur le cadre d'analyse nécessaire pour évaluer la robustesse des performances du blé tendre dans un environnement changeant.

II. Contexte et défis liés à la production de blé tendre en France

II.1. Géographie et géoéconomie du blé tendre

Le blé tendre (*Triticum aestivum L.*) est l'une des premières espèces à avoir été domestiquée par l'homme, il y a environ 10 000 ans, dans la région dite du Croissant Fertile qui s'étale sur une région qui va, dans la géographie actuelle, du sud-est de la Turquie au nord de la Syrie (Lev-Yadun *et al.*, 2000). C'est aujourd'hui l'une des espèces les plus cultivées dans le monde : elle est classée troisième en termes de production mondiale (700 millions de tonnes produites en 2016) après le maïs (*Zea mays*) et le riz (*Oryza sativa*), mais première en termes d'importance des échanges mondiaux (150 millions de tonnes commercialisées à travers le monde).

Les cinq principaux pays producteurs de blé sont, par ordre décroissant, la Chine (126 millions de tonnes en 2014), l'Inde (95 Mt), la Russie (60 Mt), les Etats-Unis (55 Mt) et la France[1] (39 Mt). Mais ces cinq pays sont concurrencés sur les marchés internationaux par l'émergence d'un second groupe d'acteurs, composé du Canada, de l'Australie, du Pakistan, de la Turquie et des pays dits de la mer Noire (Ukraine, Kazakhstan). Ces derniers exercent une influence croissante sur les prix mondiaux en raison de la grande variabilité des volumes produits chaque année, liée aux aléas climatiques auxquels sont exposées ces régions du monde (L'Herbier *et al.*, 2015). Ceci est d'autant plus vrai que nombreux sont les pays qui, sous l'égide des négociations agricoles multilatérales hier du GATT (General Agreement on Tarifs and Trade), aujourd'hui à l'OMC (Organisation mondiale du commerce), ont réduit les politiques de régulation de leurs marchés respectifs, et qu'en dépit de la flambée des cours des produits agricoles de 2007-08, il n'a pas été possible de mettre en place des politiques coordonnées à l'échelle mondiale de régulation des volumes et des prix des matière premières agricoles.

Le rendement mondial moyen du blé tendre est d'environ 3 tonnes à l'hectare (t/ha), avec de grandes disparités régionales (Figure 1). Les rendements sont les plus élevés dans les pays de l'Union Européenne (5,7 t/ha en moyenne) où la terre est plus rare et les exploitations fortement mécanisées et basées sur un modèle de production intensif. Les rendements y sont également plus stables (Duc *et al.*, 2013), même si 2016 fait exception en France avec une forte chute du rendement de blé en raison des fortes intempéries au printemps, notamment par comparaison avec des pays comme l'Australie, le Kazakhstan ou l'Ukraine, dont les rendements peuvent varier du simple au double selon le climat de l'année (0,9 t/ha en 2006 contre 2,1 t/ha en 2011 pour le cas australien).

[1] L'Union Européenne composée de 28 Etats-membres est le premier producteur mondial avec 137 millions de tonnes de blé tendre produites en 2014 et parmi les principaux importateurs (5 à 7,5 Mt).

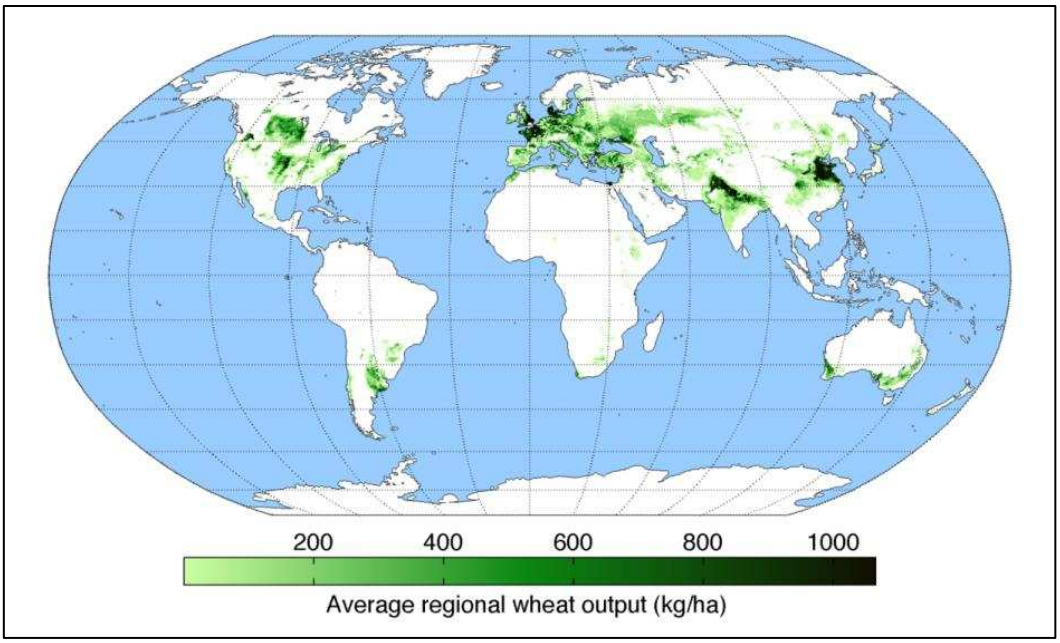


Figure 1 : Carte des rendements moyens du blé tendre par hectare observés dans le monde (Monfreda et al., 2008)

En France, le blé tendre occupe le premier rang des cultures annuelles avec une couverture de plus de 5 millions d'hectares en 2016 (20 % de la surface agricole utile nationale). La moitié des surfaces se situe dans le nord de la France mais la culture est présente dans la quasi-totalité du territoire national (Figure 2). Son cycle long, d'octobre à juillet, sa large gamme de dates de semis et sa relative adaptation aux milieux défavorisés en font, en effet, une culture facile à implanter sur une grande diversité de milieux. Le blé tendre est toutefois une culture assez sensible aux fortes températures et aux excès d'eau, ce qui limite son développement dans, respectivement, le sud-est (pourtour méditerranéen) et l'extrême sud-ouest de la France (piémont pyrénéen).

Du fait des larges superficies cultivées chaque année, le blé tendre est une culture majeure des rotations de grande culture. Sa place dans les systèmes de culture est d'ailleurs en constante augmentation du fait de la spécialisation des exploitations et des territoires (Duc *et al.*, 2013). Dans le bassin de la Seine, par exemple, les rotations quadriennales de type pois-blé-betterave-blé ont été progressivement remplacées par des rotations plus courtes de type colza-blé-blé, colza-blé-orge ou blé-blé-orge (Mignolet *et al.*, 2007). A l'échelle nationale, le blé est précédé dans 17 % des cas par un autre blé, ce qui favorise les adventices et les maladies inféodées à cette culture (Meynard *et al.*, 2013).

Cette spécialisation résulte historiquement de la combinaison de nombreux facteurs techniques, économiques mais aussi politiques dont certains ont fortement favorisé l'augmentation des surfaces en blé tendre. Parmi ces facteurs, le soutien des prix du blé puis les primes à l'hectare introduites à l'occasion de la réforme de la Politique Agricole Commune de 1992 ont, notamment, contribué à cette évolution (Chatellier and Gaigné, 2012). A l'avenir, cette spécialisation devrait se poursuivre en raison de la diminution de la main d'œuvre disponible et des contraintes liées au coût du travail dans les exploitations agricoles (Bureau *et al.*, 2015). La recherche d'une moins grande pénibilité du travail devrait également encourager le recul des activités d'élevage dans les exploitations où qualité des milieux et conditions climatiques permettent d'envisager une reconversion vers la céréaliculture.

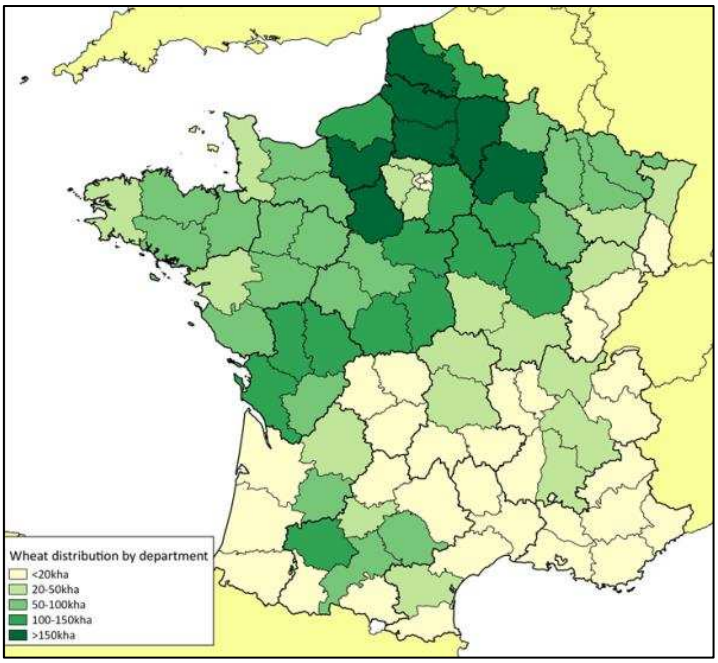


Figure 2 : Distribution par département des surfaces de blé tendre en milliers d'hectares en 2013 (Source : Agreste, 2013)

Cette place privilégiée du blé tendre dans les rotations s'explique également par des facteurs économiques et commerciaux. En effet, sur les 35 millions de tonnes de blé produits en France en 2015, près de la moitié (19,4 Mt) a été exportée, en particulier vers les pays d'Afrique et du Moyen-Orient (11,4 Mt) où la demande est croissante (Le Mouël *et al.*, 2015). Ainsi, tant pour des raisons de sécurité alimentaire mondiale que pour des raisons commerciales et géopolitiques, le maintien d'un haut niveau de production de blé tendre peut être considéré comme étant un enjeu stratégique pour la France (L'Herbier *et al.*, 2015). Les ventes de blé participent en effet à l'économie nationale, mais aussi à la stabilité et au développement des pays importateurs, dont certains (Egypte, Algérie) sont situés dans cet axe géographiquement proche et géopolitiquement instable qu'est le pourtour méditerranéen (Abis, 2015).

Néanmoins, cet objectif de maintien d'un haut niveau de production du blé tendre en France doit être mis en balance avec d'autres objectifs pour améliorer la durabilité des systèmes de culture actuels. Parmi ces objectifs, nous pouvons citer l'adaptation face aux nouvelles conditions climatiques, la réduction des pertes d'azote (par voie gazeuse qui contribuent aux émissions de gaz à effet de serre ou par lixiviation), la réduction de l'utilisation de produits phytosanitaires (appelés plus communément pesticides), l'amélioration de la qualité des grains pour une meilleure valorisation commerciale, l'amélioration des revenus agricoles et de leur stabilité dans le temps. ***Dans cette thèse, nous étudierons plus particulièrement deux de ces objectifs : d'une part l'adaptation face aux aléas climatiques et, d'autre part, la réduction de la dépendance des systèmes de culture actuels aux pesticides.***

II.2. Un défi majeur : le changement climatique

Le changement climatique est aujourd'hui considéré comme l'une des principales préoccupations environnementales. Pour le Groupe d'experts Intergouvernemental sur l'Evolution du Climat (GIEC ou IPCC en anglais), le changement climatique désigne « une variation de l'état du climat que l'on peut déceler par des modifications de la moyenne et/ou de la variabilité de ses propriétés et qui persiste pendant une longue période, généralement pendant des décennies ou plus ». Il se rapporte à tout changement du climat dans le temps, qu'il soit dû à la variabilité naturelle ou à l'activité humaine (IPCC, 2014).

A l'échelle mondiale, le changement climatique s'est manifesté par une hausse des températures moyennes de l'atmosphère et de l'océan de 0.74°C en 100 ans (période 1906–2005). Depuis 1980, chacune des trois dernières décennies a été successivement plus chaude que toutes les décennies précédentes sur la période 1850-1980 (Figure 3). Les climatologues prévoient une augmentation des températures de 0.4°C d'ici vingt ans et de 1.8 à 4°C d'ici la fin du siècle (IPCC, 2014). La variabilité interannuelle des conditions météorologiques devrait également augmenter et se traduire par une incidence plus fréquente d'événements extrêmes comme des vagues de chaleur et des sécheresses prolongées (Reidsma *et al.*, 2010).

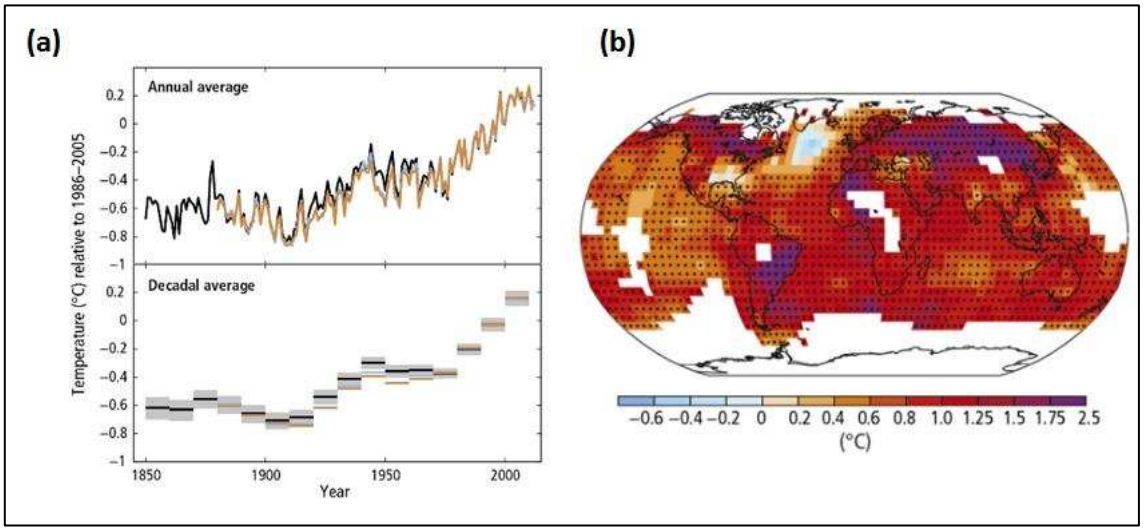


Figure 3 : Anomalies annuelles et décennales des températures moyennes de surface sur la période 1850-2012 (a) et variation de la température de surface observée sur la période 1901-2012 (b) (Source : IPCC, 2014)

Ces nouvelles conditions climatiques sont susceptibles d'avoir des conséquences sur la production agricole, notamment sur le rendement du blé tendre. De nombreuses études ont été conduites ces dernières années pour étudier, à l'aide de modèles de culture, l'effet de différents scénarios climatiques dans plusieurs régions du monde (Guo *et al.*, 2010 ; Stöckle *et al.*, 2010 ; Özdoğan, 2011 ; Liu *et al.*, 2016). Elles ont donné lieu à des publications soulignant des effets variables, parfois même contradictoires d'une région du monde à l'autre et d'un modèle de culture à l'autre. Néanmoins, Wilcox et Makowski (2014) ont montré, à travers une méta-analyse de ces simulations, que la probabilité pour que le changement climatique ait un impact négatif sur le rendement du blé à l'échelle mondiale est supérieure à 50 % dès lors que le réchauffement climatique excède 2,3°C. L'incertitude inhérente à ces simulations est due aux effets opposés sur le rendement du blé entre d'une part, température et précipitation, et, d'autre part, teneur en CO_2 sur le rendement du blé.

En France métropolitaine, les projections climatiques convergent vers une augmentation de la température moyenne de l'ordre +1,6°C pour la période 2020-2050, et de +3,0°C pour la période 2070-2100 (Brisson and Levrault, 2010). Les précipitations en hiver devraient diminuer dans le sud de l'hexagone et augmenter dans le nord, alors que la baisse des précipitations devrait être généralisée pour les autres saisons (Braconnot *et al.*, 2009). Ces phénomènes devraient également s'accompagner d'une augmentation de la variabilité interannuelle et de la fréquence des vagues de chaleur et des risques de sécheresse estivale.

Ces modifications du climat en France devraient se traduire par un raccourcissement du cycle phénologique et une plus grande précocité des stades de développement du blé tendre. Ces conséquences devraient permettre de réduire l'exposition des parcelles de blé à certaines perturbations abiotiques comme les risques de déficit hydrique au cours de la montaison. En revanche, les problèmes d'échaudage thermique risquent de s'amplifier avec l'augmentation des températures, notamment au printemps. Des effets contradictoires sont également attendus sur le développement des bioagresseurs. D'une part, la diminution des précipitations pendant le printemps devrait réduire la nuisibilité des principales maladies fongiques du blé tendre (septoriose, rouille brune et rouille jaune) mais, d'autre part, les nouvelles conditions météorologiques pourraient entraîner l'adaptation des champignons phytopathogènes et favoriser l'émergence de nouveaux bioagresseurs (Lamichhane *et al.*, 2014).

Le changement climatique ne doit pas être perçu comme une préoccupation future, mais bien comme un enjeu actuel. La responsabilité des évolutions climatiques a déjà été mise en évidence pour expliquer la stagnation observée des rendements du blé tendre depuis la fin des années 1990 en France (Brisson *et al.*, 2010). Les agriculteurs doivent donc, dès aujourd'hui, tenir compte de ce contexte climatique et de l'augmentation des phénomènes extrêmes. En 2016, les précipitations très importantes au moment de la floraison du blé et le manque de rayonnement au moment de la méiose ont provoqué une chute de plus de 30 % des rendements par rapport à la situation de 2015 (Figure 4), alors même que la plupart des modèles climatiques n'avaient pas prédit cette situation.

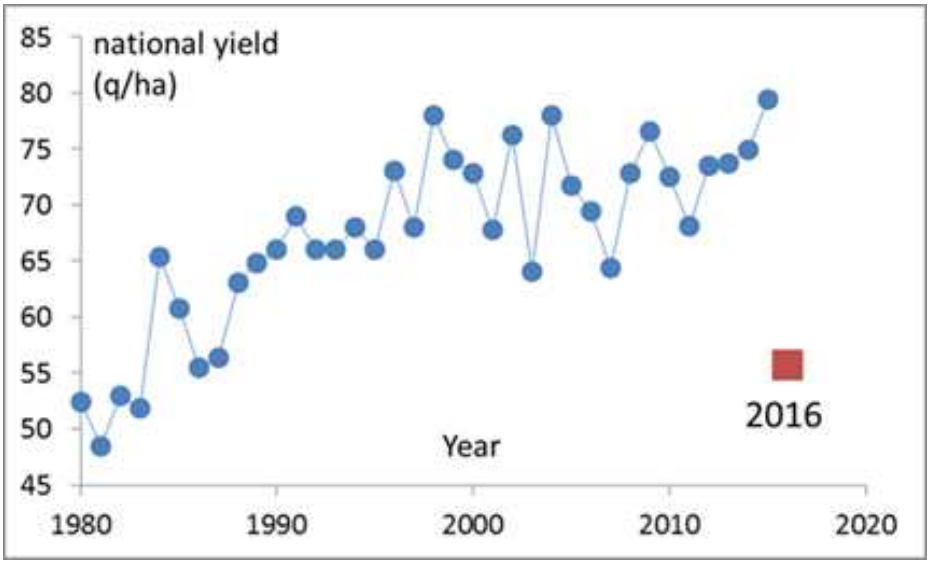


Figure 4 : Rendements moyens du blé tendre en France sur la période 1980-2016 (Agreste, 2016)

L'ensemble de ces résultats et des projections réalisées par les scientifiques plaident donc pour une meilleure adaptation des systèmes agricoles face au changement climatique et à l'augmentation de la variabilité interannuelle des conditions météorologiques (Luo *et al.*, 2009 ; Fuhrer and Gregory, 2014). Plusieurs pistes ont déjà été évoquées à l'échelle de l'exploitation agricole comme les stratégies ex-ante de diversification du risque et la souscription à des assurances récolte. Plusieurs pistes sont également à l'étude dans le cadre des politiques publiques et notamment la mise en place de dispositifs de gestion des situations de crise (en place avec la nouvelle PAC en vigueur depuis 2015), l'instauration d'aides contra-cycliques (élevés en conjoncture de prix bas, et inversement), de soutien publics à des dispositifs assurantiels ou de mutualisation…

Néanmoins, à l'échelle d'une culture donnée, comme le blé tendre, les leviers agronomiques susceptibles de réduire la variabilité des rendements face aux aléas climatiques sont moins connus. ***Nous proposons donc de focaliser notre étude sur la problématique du rendement du blé tendre en France et, plus particulièrement, sur la problématique de la robustesse de ce rendement face aux perturbations abiotiques***.

II.3. Une attente forte : la réduction de l'usage des pesticides

La France se place parmi les pays les plus consommateurs de pesticides dans le monde (Zhang *et al.*, 2011), et au deuxième rang dans l'Union Européenne après l'Espagne (Eurostat, 2015). Même si cette place s'explique en partie par la surface agricole de la France qui est plus grande que celle des autres États membres, l'agriculture française est fortement dépendante des pesticides. Cela s'explique, historiquement, par le passage en grandes cultures annuelles, au début des années 1980, d'un régime de traitements essentiellement curatifs (interventions réalisées après la détection de la présence d'un bioagresseur) à un régime de traitements essentiellement préventifs (Meynard, 2009). Faciles d'accès et d'emploi, relativement peu chers, les pesticides se sont révélés efficaces et fiables dans un nombre important de cas et sur de grandes surfaces (Blanck et Huyghe, 2016). Leur application à large échelle a contribué à l'augmentation des rendements et à la régularité de la production agricole (Popp *et al.*, 2013). Mais aujourd'hui l'utilisation de ces produits est remise en question avec la prise de conscience croissante des risques qu'ils impliquent pour l'environnement (Aubertot *et al.*, 2005) et la santé humaine (Inserm, 2013).

Ces constats ont motivé, depuis plusieurs années, un encadrement de plus en plus contraignant de l'usage des pesticides au plan européen et national. Citons notamment, dans le cadre de l'Union européenne les réformes successives de la Politique Agricole Commune (PAC) et les renforcements de la conditionnalité environnementale des aides agricoles (Desjeux *et al.*, 2011) ; l'application de la Directive cadre sur l'eau (Barraqué, 2001) qui nécessite, pour respecter les objectifs de « bon état écologique » des masses d'eau, des actions dont certaines concernent l'utilisation des pesticides ; et enfin la Directive 2009/128 (EU, 2009) qui vise à coordonner les stratégies nationales mises en place par chaque Etat membre pour réduire l'utilisation de pesticides. En France, le Grenelle de l'Environnement de 2007 a initié la mise en place de mesures volontaristes pour réduire l'utilisation de pesticides à usage agricole et non agricole. Le Plan Ecophyto (2008) puis sa nouvelle version (Potier, 2014) démontrent la préoccupation des pouvoirs publics concernant la réduction de l'usage des pesticides en France.

Le blé tendre ne fait pas partie des espèces les plus exigeantes en termes de protection phytosanitaire. Son Indice de Fréquence de Traitement[2] ou IFT (Pingault *et al.*, 2009) se chiffre en moyenne à 3,8 traitements par hectare et par an (Agreste, 2013), loin derrière la vigne (13,2), la pomme de terre (15,3) et surtout la pomme (35,1). Pourtant, compte tenu de sa place prépondérante dans la SAU française (5 sur 16 millions d'hectares de terres arables), le cumul annuel de la protection phytosanitaire sur le blé tendre représente environ 35 % des doses appliquées en France (Urruty *et al.*, 2016). Le blé est donc l'espèce la plus consommatrice de pesticides à l'échelle nationale. Les principales matières actives utilisées sur le blé correspondent aux fongicides et herbicides, alors que les doses d'insecticides et de régulateurs de croissance sont plus faibles.

Alors que plusieurs études avaient souligné la faisabilité d'une réduction de l'usage de pesticides en France sans impact significatif sur le rendement des cultures (Butault *et al.*, 2010), les résultats du plan Ecophyto, huit ans après son lancement, ne sont pas au rendez-vous (Hossard *et al.*, 2017). Ce plan a toutefois permis de mobiliser de nombreux acteurs, de lancer un vaste mouvement volontariste autour de l'objectif de réduction de l'usage des pesticides, et de se doter de dispositifs uniques préparant cette transition, dont on doit accepter qu'elle sera lente et longue. Parmi ces dispositifs, citons le Bulletin Santé du Végétal, permettant d'alerter les agriculteurs sur le risque phytosanitaire, Certiphyto, un agrément permettant aux professionnels de réactualiser leurs connaissances sur les pesticides, et les réseaux DEPHY EXPE et DEPHY FERME, permettant de tester des systèmes de culture économes en pesticides respectivement dans des stations expérimentales et des exploitations agricoles. Les données utilisées dans cette thèse sont issues de ce dernier dispositif (DEPHY FERME).

Parmi les raisons mises en avant pour expliquer la non diminution de l'usage des pesticides depuis 2008, les difficultés de dissocier la tendance structurelle et les variations interannuelles liées au climat et celle d'identifier les facteurs décisionnels des agriculteurs associés à l'utilisation de pesticides sont souvent soulignées (Potier, 2014). En effet, ces derniers modulent les doses de pesticides en fonction de plusieurs paramètres, dont le niveau de pression maladies qui, lui-même, est fonction des conditions météorologiques et des caractéristiques des systèmes de culture (Meynard *et al.*, 2003). A cela s'ajoute d'autres facteurs explicatifs, comme le contexte économique qui influence l'objectif de rendement des agriculteurs et l'aversion au risque qui peut les pousser à augmenter les niveaux de protection des cultures dans une optique assurantielle (Pedersen *et al.*, 2012).

L'ensemble de ces facteurs et de leurs interactions rend difficile la mise en place de politiques ciblées. C'est pourquoi, il nous apparaît important de mieux comprendre la relation entre l'usage de pesticides et les perturbations qui affectent le système agricole. Plus spécifiquement, ***nous allons nous intéresser à la variabilité de l'IFT fongicides en fonction de la pression de maladies. Pour cela, nous allons décliner le cadre conceptuel de la robustesse afin d'identifier des leviers agronomiques susceptibles de réduire la sensibilité des systèmes de culture à la pression des maladies.***

[2] L'IFT permet d'évaluer la « pression phytosanitaire» exercée sur chaque parcelle. Il est exprimé en « nombre de doses homologuées par hectare » appliquées sur la parcelle pendant une campagne culturale. Les doses homologuées sont définies pour chaque couple « culture x produit phytosanitaire ».

III. Problématique de la thèse

Cette thèse se positionne dans le courant de recherche de l'ingénierie de la robustesse (Carlson and Doyle, 2002), mais de nombreuses passerelles existent avec les travaux relatifs à la résilience des systèmes socio-écologiques (Walker *et al.*, 2004). Tous ces travaux visent en effet à proposer des fondements théoriques, des cadres méthodologiques, mais aussi des outils opérationnels permettant d'améliorer la capacité de systèmes complexes à faire face à des perturbations de différentes natures et d'intensités variables.

Notre objet d'étude est la culture du blé tendre. Toutefois, nous prendrons en compte le système de culture dans lequel cette culture s'intègre en prenant en compte la succession de cultures et les caractéristiques de l'itinéraire technique appliqué sur les parcelles de blé (Sebillote, 1990). Les perturbations retenues incluent les perturbations abiotiques (variations des conditions météorologiques) et les perturbations biotiques (variations de la pression des maladies fongiques). Les perturbations endogènes, c'est-à-dire qui sont la conséquence directe des choix individuels des agriculteurs, de même que les perturbations économiques et/ou de politiques publiques, ne sont pas étudiées dans cette thèse.

La problématique de cette thèse est la suivante : **dans quelle mesure le cadre conceptuel de la robustesse permettrait d'améliorer les performances productives (au titre du rendement) et environnementales (au titre de l'utilisation de fongicides) du blé tendre face à des perturbations abiotiques et biotiques ?**

Notre hypothèse de recherche est que l'impact des perturbations (abiotiques ou biotiques) sur les performances du système (son rendement ou sa dépendance aux fongicides) dépend du système de culture mis en œuvre. Nous nous intéresserons donc particulièrement aux caractéristiques agronomiques des systèmes de culture permettant d'améliorer la robustesse des performances.

En conséquence, notre question de recherche est la suivante : **comment caractériser et améliorer la robustesse des performances de la culture du blé tendre insérée dans un système de cultures face à des perturbations abiotiques et biotiques ?**

Cette thèse se concentre sur l'analyse des leviers agronomiques des systèmes de culture susceptibles d'améliorer la robustesse des performances du blé tendre. Elle ne traite pas des instruments de gestion des risques agricoles, tels que les dispositifs assurantiels face aux risques de récolte ou de nuisibilité des maladies.

IV. Démarche et organisation

Cette thèse vise à enrichir les connaissances relatives à la définition, la caractérisation et l'amélioration de la robustesse des performances dans les systèmes de grandes cultures. Pour répondre à cet objectif, cette thèse est organisée en trois sections, découpées en chapitres rédigés sous la forme d'articles scientifiques, publiés ou soumis pour publication (Figure 5). Les éléments de contexte, de discussion et de confrontation avec des résultats de la littérature scientifique sont donc présents dans chacun des chapitres.

La première section porte sur le concept de la robustesse et la présentation des données qui seront mobilisées dans la suite de la thèse. Le chapitre 1 s'intéresse à la définition de la robustesse et aux différences de celle-ci avec les concepts voisins mais distincts de résilience, vulnérabilité et stabilité. Son objectif est de clarifier les origines, les avantages et les limites de chacun de ces concepts, et de passer en revue leurs utilisations récentes dans le domaine agricole. Le chapitre 2 présente les données mobilisées pour appliquer le cadre d'évaluation de la robustesse sur la problématique du blé tendre face aux perturbations abiotiques et biotiques.

La deuxième section se compose de trois chapitres qui définissent le cadre méthodologique d'évaluation de la robustesse du rendement du blé tendre face aux perturbations abiotiques. Le chapitre 3 présente l'indicateur de perturbations abiotiques développé pour étudier la robustesse du rendement. Le chapitre 4 présente le modèle économétrique utilisé pour caractériser des profils contrastés de robustesse tenant compte du niveau de rendement moyen. Enfin, le chapitre 5 propose une approche complémentaire relativement au chapitre 4, basée sur une typologie ex ante des systèmes de culture en fonction des pratiques agronomiques et l'analyse de leur robustesse face aux perturbations abiotiques.

La troisième section décrit l'application du cadre d'évaluation de la robustesse à la problématique de l'utilisation de fongicides sur blé tendre. Le chapitre 6 décrit comment est construit l'indicateur de perturbations biotiques utilisé, ainsi que les résultats de la caractérisation des systèmes les plus robustes face aux perturbations biotiques (maladies fongiques).

A la suite de ces trois sections, le dernier chapitre présente une discussion générale de la thèse. Les principaux apports et limites associées sont discutés au regard des objectifs définis précédemment. Nous concluons cette thèse en nous interrogeant sur le potentiel des nouveaux dispositifs de recherche participative tels que celui utilisé dans cette thèse.

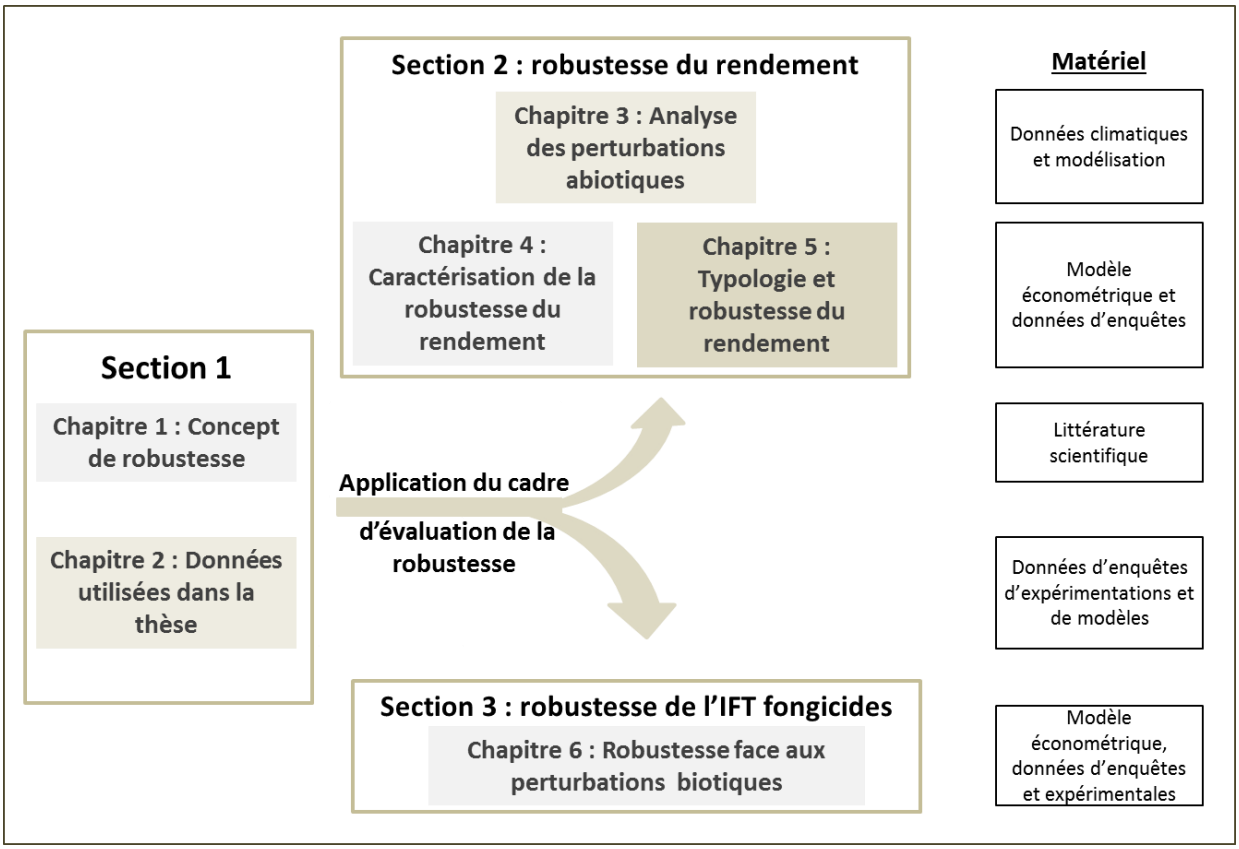


Figure 5 : Schéma d'organisation de la thèse : progression et articulation des chapitres, et matériels et méthodes mobilisés pour les traiter

V. Références

Abis, S., 2015. Géopolitique du blé – Un produit vital pour la sécurité mondiale. Armand Collin, 192 p.

Agreste, 2013. Les indicateurs de fréquence de traitement (IFT) en 2011. Agreste Les Dossiers 18.

Agreste, 2016. Statistiques annuelles – Rendement du blé tendre. Données en ligne.

Aubertot, J.N., Barbier, J.M., Carpentier, A., Gril, J.J., Guichard, L., Lucas, P., Savary, S., Savini, I., Voltz, M. (Eds.), 2005. Pesticides, agriculture et environnement. Réduire l'utilisation des pesticides et limiter leurs impacts environnementaux. Expertise scientifique collective, synthèse du rapport, INRA et Cemagref (France), 64 p.

Barraqué, B., 2001. Les enjeux de la Directive cadre sur l'eau de l'Union Européenne, Flux 46, 70-75.

Blanc, F., Ollion, E., Puillet, L., Delaby, L., Ingrand, S., Tichit, M., Friggens, N., 2013. Evaluation quantitative de la robustesse des animaux et du troupeau: quels principes retenir? Rencontres autour des recherches sur les ruminants, 265-272.

Blanck, M., Huyghe, C., 2016. Certificats d'économie des produits phytosanitaires CEPP. France Agricole Eds, 160 p.

Braconnot, P., Dufresne, J. L., Salas, D., Terray, L., 2009. Analyse et modélisation du changement climatique. Trappes: Société Météorologique de France, 2nd Rapport. 69 p.

Brisson, N., Gate, P., Gouache, D., Charmet, G., Oury, F.-X., Huard, F., 2010. Why are wheat yields stagnating in Europe? A comprehensive data analysis for France. Field Crops Research 119, 201-212.

Brisson, N., Levrault, F., 2010. Livre vert du projet CLIMATOR. Changement climatique, agriculture et forêt en France: simulations d'impacts sur les principales espèces. ADEME. 336 p.

Bureau, J. C., Fontagné, L., Jean, S., 2015. L'agriculture française à l'heure des choix. Notes du conseil d'analyse économique 8, 1-12.

Butault, J., Dedryver, C., Gary, C., Guichard, L., Jacquet, F., Meynard, J., Nicot, P.,Pitrat, M., Reau, R., Sauphanor, B., 2010. Ecophyto R&D. Quelles voies pourréduire l'usage des pesticides. Synthèse du rapport d'étude, 90 p.

Carlson, J.M., Doyle, J., 2002. Complexity and robustness. Proceedings of the National Academy of Sciences 99, 2538-2545.

Chatellier, V., Gaigné, C., 2012. Les logiques économiques de la spécialisation productive du territoire agricole français. Innovations Agronomiques 22, 185-203.

Craheix, D., Angevin, F., Bergez, J.-E., Bockstaller, C., Colomb, B., Guichard, L., Reau, R., Doré, T., 2012. MASC 2.0, un outil d'évaluation multicritère pour estimer la contribution des systèmes de culture au développement durable. Innovations Agronomiques 20, 35-48.

Darnhofer, I., Bellon, S., Dedieu, B., Milestad, R., 2010. Adaptiveness to enhance the sustainability of farming systems. Agronomy Sustainable Development 30, 545-555.

de Goede, D.M., Gremmen, B., Blom-Zandstra, M., 2013. Robust agriculture: Balancing between vulnerability and stability. NJAS - Wageningen Journal of Life Sciences 64–65, 1-7.

de Lattre-Gasquet, M., Le Mouël, C., & Mora, O., 2016. Agrimonde-Terra, a Foresight Exercise on Land Use and Food Security in 2050: Scenario-building Method and Conceptual Framework. Working paper Cirad – INRA, 45 p.

Dorin, B., Paillard, S., Treyer, S., 2010. Agrimonde: Scénarios et défis pour nourrir le monde en 2050. Éditions Quae, 295 p.

Dron, D., 2013. La résilience: un objectif et un outil de politique publique. Son apparition en France et quelques perspectives. Annales des Mines 72, 12-17.

Duc, G., Barbottin, A., Valentin-Morison, M., Magrini, M.-B., Huyghe, C., Abecassis, J., Charmet, G., Debaeke, P., Schneider, A., Petit, M.-S., Gastal, F., Biarnes, V., Georget, M., 2013. Filières Grandes Cultures. In: Coudurier, B., Georget, M., Guyomard, H., Huyghe, C. (Eds.), Vers des agricultures à hautes performances. Volume 4: Analyse des voies de progrès en agriculture conventionnelle par orientation productive. INRA, Paris, pp. 21-39.

Desjeux Y., Dupraz P., Thomas A., 2011, « Les biens publics en agriculture, une voie vers l'écologisation de la PAC », Colloque « Ecologisation des politiques publiques et des pratiques agricoles », 16-18 mars 2011, Avignon.

Evans, L., Fischer, R., 1999. Yield potential: its definition, measurement, and significance. Crop Science 39, 1544-1551.

Ecophyto Plan, 2008. Réduction des Usages de Pesticides 2008–2018, Available from : http://agriculture.gouv.fr/ecophyto-english.

EU (Official Journal), 2009. Directive 2009/128/EC of the European Parliamentand of the Council of 21 October 2009 Establishing a Framework forCommunity Action to Achieve the Sustainable Use of Pesticides. EuropeanUnion, pp. 71–86.

Fuhrer, J., Gregory, P.J. (Eds.), 2014. Climate Change Impact and Adaptation in Agricultural Systems: Soil Ecosystem Management in Sustainable Agriculture (Vol. 5). CABI, 298 p.

Gis Sol, 2011. L'état des sols de France. Groupement d'intérêt scientifique sur les sols, 188 p.

Godard, O., Hubert, B., 2002. Le développement durable et la recherche scientifique à l'INRA. Rapport intermédiaire de mission. 57 p.

Guo, R., Lin, Z., Mo, X., Yang, C., 2010. Responses of crop yield and water use efficiency to climate change in the North China Plain. Agricultural Water Management 97, 1185-1194.

Guyomard, H., Huyghe, C., Peyraud, J. L., Boiffin, J., Coudurier, B., Jeuland, F., Urruty, N., 2013. Vers des agricultures à hautes performances. Volume 2 : Conception et évaluation de systèmes innovants en agriculture conventionnelle. Inra, Paris, 176 pages + annexes

Hossard, L., Guichard, L., Pelosi, C., Makowski, D., 2017. Lack of evidence for a decrease in synthetic pesticide use on the main arable crops in France. Science of The Total Environment 575, 152-161.

Inserm, 2013. Pesticides : effets sur la santé. Synthèse et recommandations de l'expertise collective. Inserm (France), 161 p.

IPCC, 2014. Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Summary of IPCC Fifth Assessment Report (WGII AR5), 32 p.

Lamichhane, J.R., Barzman, M., Booij, K., Boonekamp, P., Desneux, N., Huber, L., Kudsk, P., Langrell, S.R., Ratnadass, A., Ricci, P., 2014. Robust cropping systems to tackle pests under climate change. A review. Agronomy for Sustainable Development 35, 443–459.

Le Mouël, C., Forslund, A., Marty, P., Manceron, S., Marajo-Petitzon, E., Caillaud, M-A., Schmitt, B., 2015. Le système agricole et alimentaire de la région Afrique du Nord – Moyen-Orient à l'horizon 2050 : projections de tendance et analyse de sensibilité. Rapport final de l'étude réalisée pour le compte de Pluriagri, Paris et Rennes : INRA-DEPE & INRA-SAE2, 133 p.

Lev-Yadun, S., Gopher, A., Abbo, S., 2000. The cradle of agriculture. Science 288, 1602-1603.

L'Herbier, C., Carel, Y., Dubois, M., Leveau, V., Pagès, B., 2015. Des coûts de production en hausse dans les principaux pays exportateurs de blé et de maïs. In : Agriculture et foncier : concurrences entre usages des sols et entre usagers des sols agricoles : la question foncière renouvelée. Cahier Demeter 15, 119-152.

Liu, B., Asseng, S., Muller, C., Ewert, F., Elliott, J., Lobell, D.B., Martre, P., Ruane, A.C., Wallach, D., Jones, J.W., Rosenzweig, C., Aggarwal, P.K., Alderman, P.D., Anothai, J., Basso, B., Biernath, C., Cammarano, D., Challinor, A., Deryng, D., Sanctis, G.D., Doltra, J., Fereres, E., Folberth, C., Garcia-Vila, M., Gayler, S., Hoogenboom, G., Hunt, L.A., Izaurralde, R.C., Jabloun, M., Jones, C.D., Kersebaum, K.C., Kimball, B.A., Koehler, A.-K., Kumar, S.N., Nendel, C., Oleary, G.J., Olesen, J.E., Ottman, M.J., Palosuo, T., Prasad, P.V.V., Priesack, E., Pugh, T.A.M., Reynolds, M., Rezaei, E.E., Rotter, R.P., Schmid, E., Semenov, M.A., Shcherbak, I., Stehfest, E., Stockle, C.O., Stratonovitch, P., Streck, T., Supit, I., Tao, F., Thorburn, P., Waha, K., Wall, G.W., Wang, E., White, J.W., Wolf, J., Zhao, Z., Zhu, Y., 2016. Similar estimates of temperature impacts on global wheat yield by three independent methods. Nature Clim. Change 6, 1130-1136.

Luo, Q., Bellotti, W., Williams, M., Wang, E., 2009. Adaptation to climate change of wheat growing in South Australia: analysis of management and breeding strategies. Agriculture, Ecosystems & Environment 129, 261-267.

Mazoyer, M., Roudart, L., 2002. Histoire des agricultures du monde : du néolithique à la crise contemporaine. Seuil (Ed.), 705 p.

Meadows, D.H., Meadows, D.L., Randers, J., Behrens, W., 1972. The limits to growth. Universe Books, 205 p.

MEDDE, 2014. L'environnement en France, édition 2014. Ministère de l'Ecologie, du Développement Durable et de l'Energie, Paris, pp. 55-62.

Meynard, J. M., Doré, T., Lucas, P., 2003. Agronomic approach: cropping systems and plant diseases. Comptes Rendus Biologies 326, 37-46.

Meynard, J.M., 2009. Conclusion: Quelles priorités pour la R&D en agriculture biologique?. Innovations agronomiques 4, 495-498.

Meynard, J.M., Messéan, A., Charlier, A., Charrier, F., Le Bail, M., Magrini, M.B., Savini, I., 2013. Freins et leviers à la diversification des cultures: étude au niveau des exploitations agricoles et des filières. OCL 20, 10 p.

Mignolet, C., Schott, C., Benoît, M., 2007. Spatial dynamics of farming practices in the Seine basin: Methods for agronomic approaches on a regional scale. Science of the total environment 375, 13-32.

Monfreda, C., Ramankutty, N., Foley, J. A., 2008. Farming the planet: 2. Geographic distribution of crop areas, yields, physiological types, and net primary production in the year 2000. Global biogeochemical cycles 22, 19 p.

Ollion, E., 2015. Evaluation de la robustesse des vaches laitières: entre aptitudes biologiques des animaux et stratégies de conduite des éleveurs. INRA. Université Blaise Pascal-Clermont-Ferrand II, Clermont-Ferrand.

ONU, 1987. Rapport Brundland, notre avenir à tous. Oxford University Press, 349 p.

Özdoğan, M., 2011. Modeling the impacts of climate change on wheat yields in Northwestern Turkey. Agriculture, ecosystems & environment 141, 1-12.

Papy, F., Goldringer, I., 2011. Cultiver la biodiversité. Courrier de l'Environnement de l'INRA, 55-62.

Pedersen, A. B., Nielsen, H. Ø., Christensen, T., & Hasler, B., 2012. Optimising the effect of policy instruments: a study of farmers' decision rationales and how they match the incentives in Danish pesticide policy. Journal of Environmental Planning and Management 55, 1094-1110.

Pellerin, S., Bamière, L., Pardon, L., 2015. Agriculture et gaz à effet de serre: dix actions pour réduire les émissions. Quae, 200 p.

Pingault, N., Pleyber, E., Champeaux, C., Guichard, L., Omon, B., 2009. Produitsphytosanitaires et protection intégrée des cultures: l'indicateur de fréquencede traitement. Notes et études socio-économiques 32, 61–94.

Popp, J., Pető, K., Nagy, J., 2013. Pesticide productivity and food security. A review. Agronomy for sustainable development 33, 243-255.

Potier, D., 2014. Pesticides et agro-écologie : les champs du possible. Rapport de Dominique Potier au Premier Ministre. Paris, 252 p.

Reidsma, P., Ewert, F., Lansink, A. O., Leemans, R., 2010. Adaptation to climate change and climate variability in European agriculture: the importance of farm level responses. European journal of agronomy 32, 91-102.

Sebillotte, M., 1990. Système de culture, un concept opératoire pour les agronomes. Les systèmes de culture, 165-196.

Stöckle, C. O., Nelson, R. L., Higgins, S., Brunner, J., Grove, G., Boydston, R., Whiting, M., Kruger, C., 2010. Assessment of climate change impact on Eastern Washington agriculture. Climatic Change 102, 77-102.

ten Napel, J., Bianchi, F.J.J.A., Bestman, M.W.P., 2006. Utilising intrinsic robustness in agricultural production systems. Invention for a sustainable development of agriculture. TransForum, Zoetermeer, pp. 32-54.

ten Napel, J., van der Veen, A.A., Oosting, S.J., Koerkamp, P.W.G.G., 2011. A conceptual approach to design livestock production systems for robustness to enhance sustainability. Livestock Science 139, 150-160.

Tichit, M., 2014. La diversité facteur de robustesse dans les systèmes agricoles ? In: Perte de biodiversité et vulnérabilité sanitaire des systèmes de production. Colloque ANSES, 25 juin 2014 (Paris).

Urruty, N., Deveaud, T., Guyomard, H., Boiffin, J., 2016. Impacts of agricultural land use changes on pesticide use in French agriculture. European Journal of Agronomy 80, 113-123.

Vilain, L., 2008. La méthode IDEA: indicateurs de durabilité des exploitations agricoles. Educagri éditions, 181 p.

Walker, B., Holling, C.S., Carpenter, S.R., Kinzig, A., 2004. Resilience, adaptability and transformability in social--ecological systems. Ecology and society 9, 5.

Zhang, W., Jiang, F., Ou, J., 2011. Global pesticide consumption and pollution: withChina as a focus. Proc. Int. Acad. Ecol. Environ. Sci. 1, 125–144.

SECTION 1 : LA ROBUSTESSE, DU CONCEPT A LA MISE EN PRATIQUE SUR UN LARGE RESEAU DE PARCELLES DE BLE TENDRE

Chapitre 1 : Revue de la littérature sur les concepts de stabilité, robustesse, vulnérabilité et résilience

Ce chapitre se présente sous forme d'article et a été publié dans la revue internationale Agronomy for Sustainable Development en mars 2016. Il présente les différents cadres conceptuels mobilisables pour étudier la variabilité des performances en agriculture. Quatre concepts sont ici étudiés : stabilité, robustesse, vulnérabilité et résilience. Bien que communément utilisés, les cadres conceptuels relatifs à chaque concept sont parfois difficiles à distinguer les uns par rapport aux autres. Dans ce premier chapitre, nous cherchons à clarifier cette situation en étudiant leurs origines et leurs applications dans le domaine agricole. Nous montrons notamment que l'utilisation de ces concepts s'est nettement accrue dans les dernières décennies. Malgré des frontières parfois floues, ils peuvent néanmoins être distingués par la nature des systèmes étudiés, les niveaux d'échelles temporelles et spatiales, ainsi que par la nature des perturbations prises en compte. Des obstacles méthodologiques ont également été mis en évidence, ce qui rend leur utilisation parfois difficile. Pour terminer, nous nous sommes intéressés aux principaux leviers cités dans la littérature scientifique pour améliorer les performances des systèmes agricoles dans un environnement changeant.

Stability, robustness, vulnerability and resilience of agricultural systems. A review

Nicolas Urruty[a,b,*], Delphine Tailliez-Lefebvre[c], Christian Huyghe[a]

(a) INRA, CODIR Agriculture, 147 rue de l'Université, F-75338 Paris, France
(b) University of Poitiers, PRES France Centre Atlantique Université, 15 rue de l'Hôtel Dieu, 86073 Poitiers, France
(c) InVivo AgroSolutions, Avenue de la Grande Armée, Paris, France

Abstract

Global warming and price volatility is increasing uncertainty for the future of agriculture. Therefore agricultural systems must be sustainable not only under average conditions, but also under extreme changes of productivity, economy, environment and social context. Here we review four concepts: stability, robustness, vulnerability and resilience. Those concepts are commonly used but are sometimes difficult to distinguish due to the lack of clear boundaries. Here we clarify the role of these concepts in addressing agronomic issues. Our main findings are: 1) agricultural systems face different types of perturbations, from small and usual perturbations to extreme and unpredictable changes. 2) stability, robustness, vulnerability and resilience have been increasingly applied to analyze the agricultural context in order to predict the system response under changing conditions. 3) the four concepts are distinguished by the nature of the system components, and by the type of perturbation studied. 4) assessment methods must be tested under contrasted situations. 5) the major options allowing system adaptation under extreme and unpredictable changes are the increase of diversity and the increase of the adaptive capacity.

I. Introduction

Farming activities are regularly exposed to unpredictable perturbations, i.e. changes in environmental or socio-economic constraints which cannot be anticipated. Facing uncertainties, farmers have to deal with urgent and short term tactical issues (e.g. protecting a crop from pests or taking advantage of sowing opportunities) but also with more strategic decisions driven by their medium to long term objectives (Rodriguez et al. 2011). In general, the predominant approach to mitigate the impacts of exogenous changes on cropping and livestock systems is based on controlling environmental conditions (ten Napel et al., 2006). Modern intensive farming, which relies heavily on pesticides, antibiotics, mineral fertilizers and irrigation in order to control system conditions, has proven to be a successful approach to maximize productivity per production unit and increase agricultural production in the world. The most illustrative example of this approach is greenhouse production where fruits and vegetables are grown in a highly standardized and controlled environment. Nevertheless, evidence of drawbacks of this approach is accumulating: despite a strong artificialization of agricultural landscapes and intensive use of chemical

inputs, crops and livestock around the world are still exposed to various types of exogenous perturbations, such as outbreaks of infectious diseases in animal production and development of pest and pathogen resistances to pesticides in crop production. Moreover, negative environmental impacts of intensive farming systems are evident, such as air and water pollution and loss of biodiversity (Millennium Ecosystem Assessment, 2005).

In recent years, social and political pressure for more sustainable agricultural systems showed up the need for implementing more sustainable production systems and led to the emergence of various methods and indicators to quantify the sustainability of farming activities. These methods generally include economic, environmental and societal pillars and are usually based on multi-criteria approaches addressing these different issues (Bockstaller et al., 2009). However, these methods are generally focused on the assessment of average agricultural outputs (i.e. under conditions that are considered as "normal") and do not consider performance changes in time and space, particularly when exogenous perturbations occur. Thus, scientists and stakeholders are currently reconsidering agricultural system design in order to better take into account the variability of environmental conditions (Naylor, 2008). As part of this new vision, changes and adaptations are recognized as essential elements: the ability to continue to achieve goals despite the occurrence of perturbations is becoming a central issue in the assessment of agricultural sustainability (Tendall et al., 2015). This concern is generally expressed through a paradigm shift, from maximizing average productivity in a stable environment towards reducing performance changes in an environment subject to greater variation (Milestad et al., 2012). However, this transition requires new knowledge and expertise to characterize and assess the ability of agricultural systems to maintain high levels of agricultural outputs in a non-stable environment (Figure 6).

In the face of this challenge, different concepts such as stability, robustness, vulnerability and resilience have been developed in recent decades. Despite conceptualization from different discipline backgrounds, these four concepts all focus on the ability of diverse systems to maintain or recover their functionalities in a challenging environment. An increasing number of review articles illustrates the growing interest of scientists from different disciplines in these concepts (see, for example, Mumby et al. (2014) for a review of resilience, robustness and vulnerability applied to marine ecosystems; Gallopín (2006) for a review of vulnerability and resilience applied to socio-ecological systems and Mens et al. (2011) for a review of robustness, resilience and vulnerability applied to flood risk management). These concepts have also been used in agricultural sciences, either as equivalent terms (National Research Council, 2010), or as concepts to be combined for a more comprehensive and integrative approach (Callo-Concha and Ewert, 2014). Due to fuzzy boundaries between these four concepts, we have noticed the difficulty for some scientists in agricultural sciences in defining them correctly and understanding their differences and potential uses. Furthermore, a clear analytical framework associated with each concept is still lacking and hence limits their usefulness to assess the ability of agricultural systems to cope with perturbations.

In the present paper, we aim to clarify the potential of stability, robustness, vulnerability and resilience as operational concepts to assess the ability of agricultural systems to deal with a context of increasing uncertainty. In the following sections, the paper will first introduce agricultural systems and their exposure to exogenous changes (section 2). Then, we will review different strands of

literature to define more clearly each concept and assess their differences and respective uses in agricultural sciences (section 3). Based on recent papers, we will discuss operational methods available to characterize and quantify the ability of agricultural systems to cope with various types of perturbation (section 4). Finally, the paper will outline some key levers to improve the ability of agricultural systems to deal with a more changeable environment (section 5).

II. Agricultural systems facing a more changeable environment

In order to explore the position of each concept regarding the assessment of agricultural performance in a variable environment, we start by clarifying what agricultural systems are and what are their interactions with external drivers.

Figure 6 : Agricultural systems are facing multiple and unpredictable perturbations. The impact on a sunflower field of salted sea water flooding induced by Xynthia storm in 2010, in Rochefort area (France). Photo credit: INRA

II.1. Agricultural systems

Agricultural systems are socio-ecological systems, comprising biotechnical and social factors and dedicated to the production of productive, economic, environmental and social outputs (Renting et al., 2009). On the one hand, biotechnical factors consist of biological and technical components linked through feedback mechanisms (ten Napel et al., 2011). Biological components comprise domesticated plant and animal species but also non domesticated species like pests and pollinators of crops. Technical components consist of engineering elements designed to optimize agricultural outputs (e.g. irrigation system and decision support tools). On the other hand, social factors refer to farmers' actions and attitudes and in which may be considered separately the psychological make-up of the farmer and the characteristics of the farm household (Edwards-Jones, 2006).

According to this basic conceptual scheme, the agricultural outputs of a farm are highly influenced by the interaction between the different components that constitute biotechnical and social factors. However, agricultural systems are also embedded in larger systems such as food, institutional or social systems. Hence, they are also influenced by external drivers which can be a source of unpredictable changes for farmers.

II.2. A more changeable environment

External drivers of agricultural systems encompass bio-geophysical, social, economic and political environments that determine how agricultural activities are performed. These drivers can vary significantly in time and space and therefore can affect agricultural systems positively or negatively. Depending on the frequency, duration and predictability of these changes, Maxwell (1986) distinguished four different types of perturbations that affect agricultural systems: noise when perturbations occur on a regular basis and are usually expected by farmers, shocks when perturbations are unusual and difficult to anticipate, cycles when the variation is due to cyclical changes, and trends when the change is gradual over time.

In terms of trends, global warming is expected to impact agricultural activities gradually in the future: by the end of the twenty-first century, temperature is projected to rise by 1.4 to 5.8°C while atmospheric CO_2 concentration could reach three-to-four times the pre-industrial levels (IPCC, 2014). In Europe, simulations of future climate have suggested an increase of average temperature and a slight decrease in rainfall (Trnka et al., 2011). Livestock systems may also be impacted by global warming, directly by the effects of heat on animal health, growth and reproduction and indirectly, for herbivores, through impacts on the productivity of pastures and forage crops (Maracchi et al., 2005). Climate change is also expected to increase the risk of potential pest pressure in agriculture by providing more suitable environmental conditions for exotic pests to adapt across areas which were previously detrimental for their survival (Lamichhane et al., 2014). In this context of gradual changes, farmers and researchers can partly anticipate the impacts on agricultural activities through mitigation and adaptation programs (Olesen et al., 2011; Reidsma et al., 2010). For example, many research and implementation projects are currently dealing with adaptation strategies using local knowledge and low inputs for soil protection and water management in the context of climate change (Meynard et al., 2012).

Beyond average trends, agricultural systems are also exposed to less predictable perturbations, such as climatic or economic shocks. These perturbations, exhibiting various intensities and durations, can also heavily impact agricultural activities. For example, climate variability is considered to explain part of wheat yield stagnation in Europe since the middle of the 1990's (Brisson et al., 2010; Moore and Lobell, 2014), while food price volatility has negatively impacted farmers' income stability in recent years (Huchet-Bourdon, 2011). In addition to these individual perturbations, local issues may also interact with global economic issues and further increase overall perturbations. For example, due to the specificities of the world agricultural market (inelastic demand for agricultural products, high seasonality and relatively long production period coupled with a short shelf-life for many agricultural products), a severe climatic shock, such as drought on grain production in an exporting country, may have significant repercussions on international, national and local markets and therefore on food security and political stability on local and global scales (Sternberg, 2012).

Furthermore, the relationship between agricultural systems and their external drivers requires that the intrinsic sensitivity of agricultural systems to exogenous perturbations be taken into account. For example, the impact of market volatility during the period 2007 to 2009 was particularly severe in Europe as the progressive change of CAP policies more directly exposed farmers to commodity price volatility (Enjolras et al., 2014). Moreover, there is also increasing evidence that the trend towards specialization and homogenization of genetic diversity across agricultural landscapes (Hoisington et al., 1999) is increasing the sensitivity of many agricultural systems around the world to various types of perturbation. In cropping systems, for example, genetic and crop uniformity over large areas tends to amplify pest invasions and outbreaks (Altieri and Nicholls, 2004), while in animal husbandry, regional specialization of agricultural activities can increase sanitary risks by facilitating the spread of animal diseases (Fèvre et al., 2006).

In this context and in order to get a better understanding of the overall context in which agricultural systems are implemented, researchers have developed and used several concepts that deal with the response of agricultural systems when facing perturbations. In the next section, we introduce these different concepts, their historical backgrounds

and their main differences according to how the relationship between agricultural systems and perturbations is expounded.

III. Conceptual frameworks

We focus on four different concepts: stability, robustness, vulnerability and resilience. These four concepts are characterized by having a highly multidimensional nature and have been used in various papers related to agricultural systems. At first glance, they may appear to be linked by fuzzy boundaries and to be suitable in various contexts. Depending on authors, there is a call for more *stable* (Mishra and Sandretto, 2002), more *robust* (ten Napel et al., 2006), less *vulnerable* (Schröter et al., 2005) or more *resilient* (Naylor, 2008) agricultural systems, and sometimes a combination of all of these (de Goede et al., 2013; Tendall et al., 2015).

In order to clarify the specificities of each concept, and based upon the existing literature, we will present in this section their historical backgrounds and their main differences according to how they are used in papers related to agricultural systems. More precisely, each concept is discussed separately in order to highlight in which context it proved to be the most useful. As already pointed by Carpenter et al. (2001) concerning resilience, these multidimensional concepts acquire significance only if the studied object (the system and its boundaries), the type of output to be maintained and the nature of the perturbations are precisely defined. Thus, we will answer simple but essential questions when assessing each concept: *what kind of system is studied?, what kind of output is targeted? and against what kind of perturbation?*

Table 1 summarizes the main elements for each concept and includes some examples from agricultural sciences. It may help readers to choose the most suitable concept according to the nature of their research questions.

Table 1 : Summary of the main differences between the concepts of stability, robustness, vulnerability and resilience

Concepts		Definition in agricultural context	Nature of the system studied	Agricultural output	Perturbations
			What part of the system is studied?	*To maintain what?*	*Against what kind of perturbations?*
Stability		**Constancy of agricultural outputs over long periods of time or across various spatial environments**	**Biological components of agricultural systems**	**Individual features of biological components**	**Not explicitly defined**
	Examples	Brancourt-Hulmel (1999)	Wheat genotypes	Wheat yield	-
		Tilman et al. (2002)	Cereal crops	Agricultural production	-
		Govaerts et al. (2005)	Maize-wheat rotation (Mexico)	Maize and wheat yields	-
		Devictor and Jiguet (2007)	Farmland bird communities (France)	Farm biodiversity	-
Robustness		**Ability to maintain desired levels of agricultural outputs despite the occurrence of perturbations**	**Biological and technical components of agricultural systems**	**Individual features of biological and technical components**	**Short term and specified perturbations**
	Examples	Mosnier et al. (2009)	Livestock systems (France)	Farmers' income	Weather and price fluctuation
		Dourmad et al. (2010)	Pigs	Sow productivity	Multifactorial diseases
		ten Napel et al. (2011)	Pig production unit	Various features (pig mortality, quality of meat, ...)	Short-term variation in costs of feed, water, medication and bedding material
		Sabatier et al. (2013)	Cacao agroecosystem (Indonesia)	Cacao productivity	Pest outbreak
Vulnerability		**Degree to which agricultural systems are likely to be harmed due to perturbations**	**Biotechnical and social components of agricultural systems**	**Individual and integrated features of agricultural systems**	**Specified perturbations**
	Examples	Jalan and Ravallion (1999)	Households (China)	Household income	Risk-market failures
		Luers et al. (2003)	Farms in Yaqui Valley (Mexico)	Wheat yield	Drought
		Reidsma and Ewert (2008)	European farms	Regional wheat productivity	Climate variability
		Simelton et al. (2009)	Rice, wheat and corn production (China)	Provincial harvest production	Drought
Resilience		**Ability to absorb change and to anticipate future perturbations through adaptive capacity**	**Biotechnical and social components of agricultural systems**	**Integrated features of agricultural systems**	**Specific perturbations to unpredictable changes**
	Examples	Darnhofer (2010)	Family farms (Austria)	Adaptability and transformability of the farms	Changes in the economic and political framework
		David et al. (2010)	Organic farms (France)	Flexibility of organic farms	Market fluctuations and regulatory changes
		Astigarraga and Ingrand (2011)	Limousin beef systems (France)	Flexibility to match different factors of uncertainty	Market variations and climatic fluctuations
		Rodriguez et al. (2011)	Farms in Australia	Farm profit	Climate change scenarios

III.1. The Concept of Stability

The word stability originates from the Latin *stabilis*, meaning to stand firm or steady. It has been widely used in several scientific disciplines (mathematics, engineering, economic, social and natural sciences) to express the ability of an object to maintain equilibrium. In natural sciences, the concept of ecological stability was first defined as the constancy of a given attribute, regardless of the presence of disturbing factors (Justus, 2008). For example, stable ecological communities were those with relatively constant population sizes and compositions (MacArthur, 1955). Later, the definition of ecological stability has been expanded to describe other properties of ecosystems, such as the ability to maintain ecological functions despite disturbances (Turner et al., 1993) or the ability to return to the initial equilibrium state (Ives and Carpenter, 2007). This led to multiple definitions and interpretations of stability (Grimm and Wissel, 1997) and sometimes to the feeling that it is defined in many ways depending on how scientists wish to look at the problem (Lin et al., 1986).

In agricultural sciences, the concept of stability has been mainly used with the original meaning of ecological stability, i.e. as a criterion to measure the spatial or temporal constancy of specific features of agricultural systems (Figure 7a). For example, the stability of genotypes has been widely used in plant breeding programs in order to identify genotypes that maintain specific features (e.g. yield or protein content in the grain) over a wide range of environments (Brancourt-Hulmel, 1999; Sabaghnia et al., 2012). Based on genotype x environment interactions, two types of stability are sometimes distinguished: i) static stability which refers to a genotype for which variance is small between different environments and ii) dynamic stability which refers to a genotype for which the response to various environments is correlated to the mean response of all genotypes in the trial (Annicchiarico, 2002). In other terms, the first type of stability focuses on constancy regardless of the variability in systems environments whereas the second type of stability includes these environmental differences.

Even though analysis of yield stability has been largely confined to multi-environment trials for comparing spatial stability of crop cultivars, stability analysis has also been applied to compare the temporal stability of different agronomic treatments in long term experiments. For example, Berzsenyi et al. (2000) and Govaerts et al. (2005) implemented stability analysis to evaluate the effect of diverse crop rotations, fertilization treatments or tillage management techniques on crop yield stability.

Considering these first elements, it appears that the concept of stability has been applied in agricultural studies with a meaning relatively close to ecological constancy, i.e. as the stability of agricultural outputs in time or space but without explicitly referring to the external drivers of change and to the occurrence of perturbations. Moreover, the concept of stability has been mainly applied to individual components (e.g. genotypes) or outputs (e.g. yield or income) of agricultural systems rather than through a more integrated approach. Hence, it may show a low potential for describing and explaining the behavior of complex agricultural systems in a context of unpredictable changes.

III.2. The Concept of Robustness

The word *robustness* comes from the Latin robustus, meaning strong. Widely used in statistics to refer to methods that are not affected by small deviations from model assumptions (Maronna et al., 2006), robustness also emerged in recent years as a major concept for analyzing the response of diverse objects facing perturbations. Industrialists and

engineers first mobilized this concept in the early 1950s in order to optimize the manufacturing design of various devices and reduce their sensitivity to variation over which makers have little or no control (Taguchi and Clausing, 1990). Subsequently, robustness theory was applied to various engineering processes, such as information networks, electronic circuits or flight control systems in airplanes in order to make them capable of operating under a wide range of constraints (Fowlkes et al., 1995).

More recently, the concept of robustness has also been used by biologists to describe the ability of living systems to maintain specific functionalities despite unpredictable environmental or genetic perturbations (Kitano, 2004). For example, biological robustness can be illustrated by the ability of genomes to compensate for the loss of function in one gene by means of other copies of this gene (Gu et al., 2003). Based on these observations from engineering and biological sciences, robustness has been described as an intrinsic property of complex adaptive systems (Carlson and Doyle, 2002) and as an important trait for the species' capacity to evolve through natural selection (Wagner, 2008).

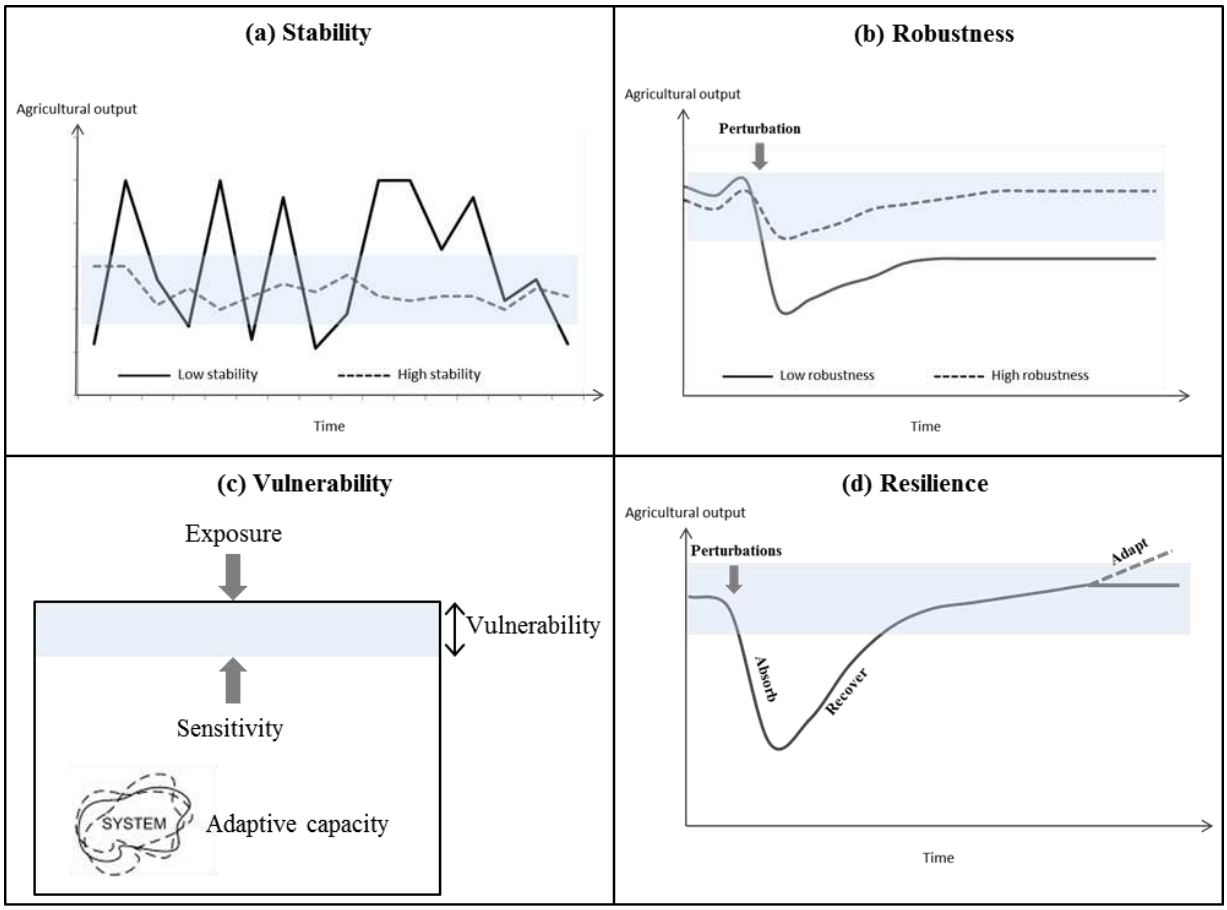


Figure 7 : Illustration of stability, robustness, vulnerability and resilience concepts (adapted from Mumby et al. (2014) and de Goede et al. (2013)).

Comprising both technical and biological domains, agricultural systems can also be defined as complex and adaptive systems. Hence, the robustness concept was recently introduced into agricultural sciences and has been used in an increasing number of scientific papers to represent the complex interactions between the biotechnical factors of agricultural systems and external drivers of change (de Goede et al., 2013; ten Napel et al., 2006; Verhagen et al., 2010). In these papers, robustness has been mainly defined as the ability to minimize the variability of specific agricultural outputs despite the occurrence of explicitly defined perturbations (Figure 7b).

A large part of the literature recently devoted to this subject deals with robustness as a key breeding goal for animal farms (Knap, 2005; Sauvant and Martin, 2010; Star et al., 2008). The aim is to select animals that achieve a high production level in a wide diversity of environmental conditions, including stressful conditions. These stressors can be disease challenges, extreme temperatures, low-quality feed or challenges due to changes in housing or management (Merks et al., 2012). However, robustness has also been discussed in the context of cropping systems exposed to climatic or biotic perturbations. For example, Sabatier et al. (2013) compared the robustness of two contrasting types of management strategies for a cacao agroecosystem in Indonesia facing pest outbreaks and pesticide changes.

Applied to agricultural systems facing an environment subject to perturbations, two forms of robustness are frequently distinguished and sometimes called respectively passive and active robustness: i) resistance, i.e. the withstanding or tolerance of perturbations, and ii) flexibility, i.e. the ability to adapt the configuration of the system in order to limit damage (ten Napel et al., 2006). For example, robustness on a pig farm level can include genetic components of heat stress tolerance in pigs (passive robustness) and temperature control systems to adjust indoor conditions in real time (active robustness).

To conclude, we might say that robustness is a concept that goes further than stability through a more precise description of the interactions between agricultural systems (and their different components) and changes in environmental conditions. Due to its history, robustness appears to be a concept that better integrates biological and technical aspects of agricultural systems than stability. However, it rarely takes into consideration the social aspects of agricultural systems.

III.3. The Concept of Vulnerability

The term vulnerability originates from the Latin word *vulnus*, meaning injury. Vulnerability thus refers to a state of fragility, a disposition to be hurt. This concept started to be used in the 1970s by geographers and social scientists in risk management issues to describe the fragility of certain communities or countries facing severe environmental or socio-economic risks, such as earthquakes (Blaikie et al., 1994) or food exchange crises (Watts and Bohle, 1993). In the decade after 2000, the use of the vulnerability concept increased sharply with its adoption by the Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) to assess the potential impacts of global warming at regional and global levels (Mc Carthy et al., 2001). As a result, vulnerability recently became a very central focus of the global change science research community for discussing and defining adaptation and mitigation plans (Downing et al., 2005).

Based on the seminal work by IPCC, the vulnerability concept benefits from a highly operational framework to describe the relationship between the studied system and its environment (Adger, 2006; Luers et al., 2003; Paavola, 2008; Turner et al., 2003). This framework usually distinguishes between three

distinct elements (Figure 7c): i) the level of exposure (i.e. the frequency, intensity and duration of perturbations affecting the studied system), ii) the level of sensitivity (i.e. the degree to which the studied system is affected by exposure to perturbations) and iii) the adaptive capacity (i.e. the ability of the studied system to deal with perturbations and increase the extent of variability it can cope with).

This operational framework of vulnerability has allowed its use in several fields, including agriculture for which it has been applied at various spatial scales (from farms to countries) but with an emphasis on the regional level (Reidsma and Ewert, 2008; Simelton et al., 2009). The vulnerability of agricultural systems has mainly been studied with regard to the exposure to climatic perturbations, such as temperature changes (Luers et al., 2003), drought (Simelton et al., 2009) or floods (McLeman and Smit, 2006; Silva and Lucio, 2014). It has also been used to describe the response of agricultural systems exposed to diverse socio-economic changes, such as market fluctuations (Luers et al., 2003) or land-use changes (Metzger et al., 2006). Sensitivity level generally refers to biotechnical or socio-economic factors that are intrinsic to agricultural systems and interact with external perturbations to amplify or reduce their impacts. For example, the level of sensitivity of a crop to drought depends to a high degree on soil characteristics and access to irrigation (Wilhelmi and Wilhite, 2002). At regional level, the level of sensitivity of Indian farmers to international trade has been evaluated as a function of crop productivity and distance to major ports (O'Brien et al., 2004).

The third factor of vulnerability, the adaptive capacity of agricultural systems, is usually described as the system's ability to design and implement effective changes so as to reduce the impacts of harmful perturbations. In practice, adaptive capacity represents the set of natural, financial, institutional or human resources that agricultural systems can mobilize for coping with constraints and overcoming them (Brooks and Adger, 2005). Hence, the adaptive capacity of agricultural systems encompasses both internal and external factors that can be used to deal with a changeable environment. For example, Tengö and Hammer (2003) analyzed the role of both management practices and the institutional framework for promoting the adaptive capacity of northern Tanzanian agro-pastoralists.

Thus, vulnerability can be seen as a concept mainly focused on the assessment of the potential impacts of perturbations and on the target measures needed to reduce them. Compared to the concepts of stability and robustness, vulnerability appears to be a broader concept that encompasses the biotechnical and social factors of agricultural systems. It benefits from an operational framework that simplifies its use in various agricultural contexts, including institutional, social and financial determinants.

III.4. The Concept of Resilience

The word resilience comes from the Latin *resilio*, meaning to rebound. Resilience was originally used in material and psychology sciences to describe the resistance of materials to physical shocks (Winson, 1932) and the ability of individuals to cope with adversity, trauma or other significant sources of stress (Murphy, 1974), respectively. In ecology, Holling (1973) popularized this term by defining the resilience of ecological systems as a measure of their persistence when confronted by unpredictable perturbations and of their ability to absorb change. Subsequently, the concept of resilience has been increasingly adopted as a generic approach to describe social-ecological systems as complex entities which are continually transforming themselves through cycles of change (Carpenter et al., 2001; Folke et al., 2010; Holling, 2005).

Based on extensive literature from various scientific backgrounds, resilience has been variously characterized as a loosely organized cluster of concepts (Carpenter and Brock, 2008), a collection of ideas (Anderies et al., 2006) or a way of enabling exchanges across disciplines (Brand and Jax, 2007). A first part of this literature mainly focuses on the "specific" meaning of resilience and is relatively close to the concepts of robustness and vulnerability. In such cases, resistance to perturbations and rate of recovery after their occurrence are considered as key aspects of resilience (Holling, 1996). Specific resilience has been used for example on vegetative systems to study the rate of recovery after a fire (Lavorel, 1999) or other natural hazards (MacGillivray and Grime, 1995). Accordingly, it has been discussed for particular aspect of socio-ecological systems and for well-characterized perturbations, such as storms, earthquakes, floods and fires, for which existing knowledge provides a basis for building specified resilience (Carpenter et al., 2012). Another part of recent literature was more oriented towards the "general" meaning of resilience, i.e. the capacity of socio-ecological systems to adapt and transform in response to unfamiliar, unexpected and extreme shocks (Holling, 2005). In such papers, general resilience is studied through the way that socio-ecological systems persist and innovate when facing unknown perturbations (Walker and Salt, 2006). This second aspect of resilience is more difficult to apprehend because it refers to potential changes outside the scope of experience. For example, it has been used to study how socio-ecological systems are transforming themselves in order to continue to achieve specific goals, to better anticipate critical transitions in the future (Scheffer et al., 2012) and improve conservation plans (Standish et al., 2014).

Resilience thinking, referring both to specific and general aspects of resilience, has been applied to a wide variety of social-ecological systems, such as everglades (Gunderson et al. 2002), marine ecosystems (Mumby et al., 2014) and forests (Parrott and Meyer, 2012) but less frequently to agricultural systems. This might be explained by marked differences between agricultural and other socio-ecological systems, such as a smaller spatial scale, a high controllability of the ecological structure and processes on the farm by human activities, and the strong influence of economic drivers to ensure both the short-term and long-term economic survival of agricultural systems (Darnhofer, 2010). Moreover, despite some extreme examples such as the Dust Bowl period in the 1930s in North America, after which farmers fundamentally changed their practices and adopted planting and plowing methods that ensured a better conservation of the soil, critical transformations of agricultural systems are not easy to analyze , particularly over short time-periods.

Nevertheless, despite these differences, the resilience concept has recently been applied to several studies dealing with the behavior of agricultural systems facing various kinds of perturbation. Reflecting the contrasting understandings of this concept, the resilience of agricultural systems has been used in several ways: sometimes to measure the degree of resistance to shock in the face of economic (Abson et al., 2013) or climatic perturbations (Keil et al., 2008); but more frequently as the ability of agricultural systems to preserve their intrinsic functions through flexibility (Astigarraga and Ingrand, 2011; Carlisle, 2014) and plasticity (Rodriguez et al., 2011). In these cases, resilience is mainly used to discuss the factors that build the ability of agricultural systems to respond to changes, to reorganize their structure, to anticipate future changes and to take advantage of new opportunities (Folke et al., 2002).

Resilience is probably the broadest concept among the four discussed in this paper. Applied to agricultural systems, it appears to be a

heuristic framework that is most relevant on a long-term basis in order to describe and understand farm transformations over periods of time marked by significant economic, environmental or sanitary crises (van der Leeuw and Aschan-Leygonie, 2000). It embeds both a time scale approach and a recovery process (Figure 7d). Hence, contrary to the concept of vulnerability which focuses on the direct impacts of specific perturbations on a given feature of the system, the resilience concept mostly focuses on the consequences of one to several perturbations, including unpredictable ones, on the overall trajectory of the system (Mathevet and Bousquet, 2014).

IV. From concepts to assessment in agricultural systems

Based on review literature concerning stability, robustness, vulnerability and resilience, it appears that the research community has produced an insightful and extensive literature in recent years to describe and understand better the behavior of various systems, including agricultural systems, in a context of unpredictable change. However, operationalization of these concepts into empirical assessments remains limited due to their multidimensional nature and because they are not directly observable phenomena (Callo-Concha and Ewert, 2014). The situation is even more complicated when assessments are extended from time-limited events, such as drought, to gradual perturbations such as climate change. Hence, there is an urgent need to have a better knowledge of the models and metrics available to quantify the ability of agricultural systems to cope with various types of perturbation.

In this section, we review existing approaches that have been used in empirical studies to quantify the stability, robustness, vulnerability and resilience of agricultural systems. These approaches are classified in three categories according to the system level at which they were used: i) approaches focusing on the variability of agricultural outputs regardless of the context of perturbations; ii) approaches focusing on the relationship between agricultural outputs and perturbations; and iii) approaches including a broader scale and taking into consideration the adaptive capacity of agricultural systems. We illustrate and discuss these different approaches through the description of some case studies.

IV.1. Variability of agricultural outputs

The first approach, and probably the simplest one, quantifies the ability of agricultural systems to cope with a changeable environment by characterizing agricultural outputs and their variability across large environmental (time, space, management practices) series. This approach has been used in various studies and can be carried out using different statistical methods. A first method is to quantify the statistical deviation of agricultural outputs from the average or median and can be undertaken using common indices of statistical dispersal (e.g. standard deviation, coefficient of variation, interquartile range). For example, Abson et al. (2013) used the coefficient of variation of economic returns to study the impact of landscape diversity on economic “resilience” in the UK between 1996 and 2010.

Other methods focus more on the behavior of agricultural systems facing rare but extreme perturbations. These methods are mainly used in risk assessment studies (Iglesias and Quiroga, 2007; Luo et al., 2009) and are usually based on the analysis of output anomaly distribution. For example, Cernay et al. (2015) analyzed the yield anomaly distribution of diverse grain legumes over the period 1961-2013 in order to compare variability in legumes yields across Europe and the Americas. More precisely, they used value at 10th percentile risk as a measure to assess in which countries legume yield losses have been the largest over this period. Lastly,

other methods focus on the probability of achieving farmers' goals and can be measured as the probability that agricultural outputs remain above a certain threshold. For example, Sabatier et al. (2015) used a stochastic model of grassland dynamics to measure, for various grazing strategies, the likelihood of fulfilling the feeding requirements of grazing animals. They quantified it as the percentage of weather sequences for which the grass resource was sufficient to feed the herd present on the grasslands every day.

Finally, this first approach is relatively close to the stability concept because it does not explicitly characterize and take into account the intensity and variability of perturbations that affect agricultural systems. It only describes a part of the ability to cope with an environment subject to perturbations and it does not deal satisfactorily with the ability of agricultural systems to resist and adapt to specific perturbations.

IV.2. Relationship between agricultural outputs and perturbations

This second approach focuses on the response of agricultural systems to specific perturbations and has been used in various studies, referring both to robustness (Mosnier et al., 2009) and vulnerability frameworks (Simelton et al., 2009). More precisely, this approach is associated with the notion of resistance that is frequently used in those two frameworks to refer to a low sensitivity of agricultural outputs to environmental system conditions. As a result, resistance is measured with respect to specific perturbations affecting agricultural systems. Indeed, this approach requires the characterization and quantification of the intensity of perturbations that affect agricultural systems (Li et al., 2009; Wu and Wilhite, 2004). For example, Simelton et al. (2009) measured a drought index to assess the resistance of agricultural production in China to water deficit. The drought index was quantified as a negative rainfall anomaly, i.e. by the ratio between average amount of rainfall between 1960 and 2011 and the actual amount of rainfall for each year. In livestock systems, perturbations can refer to changes in environmental conditions. For example, the variation in the herd environment of dairy cows (Windig et al., 2006) and breeding sows (Herrero-Medrano et al., 2015) has also been studied to measure the resistance of these livestock systems to changes in environmental conditions.

Once perturbations have been characterized and quantified, the resistance of agricultural outputs to changes in environmental conditions is usually assessed through regression methods. This method has been used by various authors to study the relationship between agricultural outputs and perturbations which are highly correlated, such as yield and drought (Luers et al., 2003) or farmers income and price volatility. For example, Mosnier et al. (2009) studied the sensitivity of farmers' incomes to climatic and economic perturbations in France on a panel of 55 farms. Using multiple linear regressions, they identified the influence of stocking rates and length of production cycles on the sensitivity of livestock systems to weather and beef price variation. In Nicaragua, Holt-Giménez (2002) has studied the resistance of more than 800 farmers after Hurricane Mitch. He discriminated "conventional" and "agroecological" farms in order to study, under different levels of storm intensity, the differences of response on several indicators (e.g. erosion or economic returns). He showed that patterns of resistance are not easy to describe and include complex interactions and thresholds. However, the differences in favor of agroecological plots tended to increase with increasing levels of storm intensity, increasing slope and increasing years under agroecological practices.

Despite its potential to assess quantitatively the response of agricultural outputs to specific

changes in the system environment, this approach remains limited to biotechnical components of agricultural systems. In particular, social components, including adaptive capacity, of agricultural systems are difficult to consider in this approach.

IV.3. Multiscale and adaptive capacity assessment of agricultural systems

In order to integrate the different components of agricultural systems, a third approach is frequently used. Contrary to the two previous ones, this approach focuses on the description of internal system features through a set of proxy indicators more than on the variability or resistance of agricultural outputs. This indicator-based approach is applicable to multiple scales and can include the adaptive capacity of agricultural systems (Darnhofer et al., 2010). Consequently, this approach has mostly been used for assessing and measuring vulnerability (Gbetibouo et al., 2010) and resilience (Quinlan et al., 2015) of agricultural systems rather than their stability or robustness.

In this approach, indicators are generally chosen to describe key aspects of biotechnical and social components that are supposed to increase or decrease the ability of agricultural systems to cope with various perturbations. For example, Cabell and Oelofse (2012) compiled 13 behavior-based indicators which cover different properties of agricultural systems, such as spatial and temporal heterogeneity across landscapes and the human resources available on farms. Systems in which these 13 indicators are positively evaluated are supposed to better resist and adapt to perturbations, while a negative evaluation of these indicators points to a need for intervention. Based on the vulnerability framework, Wiréhn et al. (2015) reviewed indicators of exposure, sensitivity and adaptive capacity. The latter ones describe socio-economic factors that can assist agricultural systems to adapt and rebound better after perturbations (e.g. farm income, farm size, crop diversification). Altieri et al. (2015) used indicators of soil conservation practices, crop diversity and food self-sufficiency to describe the adaptive capacity of various agroecological farms in Latin America. These indicators are frequently aggregated and their results displayed in geographic representations to improve the identification of the most vulnerable, or less resilient, areas within a territory (O'Brien et al., 2004; Wilhelmi and Wilhite, 2002). This indicator based-approach has proven to be valuable for monitoring trends but, as reported by Wiréhn et al. (2015), is limited in its applicability by considerable subjectivity in the selection of variables and their relative weights, and by the difficulty of testing and validating the different metrics.

To conclude this section, it appears that various approaches are available to study the behavior of agricultural systems in a more changeable environment. Despite their differences, these approaches can provide additional details and improve visibility of what improves the ability of agricultural systems to cope with unpredictable changes. In particular they can provide complementary findings at different scales. In the next section, we review the main elements that emerge from researches completed to date.

V. Key levers for improving the ability of agricultural systems to cope with perturbations

Based on previous sections, it appears that various concepts and methods have been mobilized in recent years to characterize and quantify the ability of agricultural systems to cope with a changeable environment. Despite fuzzy boundaries, these concepts have specific historical backgrounds and have been applied to describe different features and behaviors of agricultural systems.

Based on literature focusing on conceptual definitions and empirical assessments in agricultural studies, some key levers are emerging as important properties for a transition towards more stable, more robust, less vulnerable or more resilient agricultural systems. These generic elements are summarized in two categories: first, increasing the intrinsic diversity of agricultural systems and second, increasing their adaptive capacity.

V.1. Increasing diversity at different levels

Based on recent literature, many authors have emphasized the potential of increasing diversity in its various forms to improve the behavior of agricultural systems when facing various perturbations (Altieri et al., 2015; Lin, 2011; Naylor, 2008; Østergård et al., 2009). This assumption relies on the hypothesis that implementing more diversity at different levels provides greater functional redundancy, i.e. system components and organization with overlapping functions to buffer year-to-year changes. However, diversification can be implemented in a variety of forms and at a variety of scales, allowing farmers to choose a strategy that both increases their ability to cope with perturbations and provides economic benefits Lin (2011)..

Among biological components, increasing genetic diversity through cultivars and animal breeds characterized by different agronomic features (e.g. diversity in earliness for cultivars; diversity in disease resistance for animal breeds) is supposed to spread the risks of failure by reducing the overall exposure to perturbations (Di Falco and Perrings, 2003; Tooker and Frank, 2012). Increasing breeding of cultivars and animals with distinctive traits is therefore becoming a research priority to allow farmers to choose biological components adapted to various contexts and perturbations (Casadebaig et al., 2014; Knap, 2005). Similarly, increasing diversity at the species level by using crops characterized by different exposure periods and sensitivity features allows the spreading of risks through the entire cropping rotation (Lin, 2011). Following seminal work by Hector et al. (1999), Tilman et al. (2006) showed that greater complementary and functional diversity among grassland species were able to stabilize annual plant production. As reported by Huyghe et al. (2014), the use of mixtures of grasses and legumes has been largely implemented in grasslands worldwide.

Increasing diversity is also feasible by changing the nature of crop rotations and introducing perennial tree crops into annual cropping systems. Based on complementarities between annual crops and trees, agroforestry systems are characterized by a strong structural complexity (Jose, 2009). These systems have demonstrated their capacity to provide a better protection for annual crops from habitual climatic perturbations (changes in temperature and precipitation), but also from extreme perturbations such as hurricanes (Lin, 2011). At a larger scale, increasing diversity through regional landscape diversity is also a strategy for minimizing the impacts of perturbations on agricultural systems: Reidsma and Ewert (2008) showed that diversity in farm size and intensity (*e.g.* cultivar choice, fertilizer and pesticide use) reduces the regional vulnerability of wheat production to climate change. Abson et al. (2013) also found

that land-use diversification in the UK was positively correlated with the resilience of agricultural returns in the face of uncertain market and environmental conditions. Furthermore, preserving or increasing the diversity of agricultural systems can also maintain or stimulate various resources (technology, information and knowledge) at the territorial level that can be used by farmers in order to cope with current or future challenges (Nelson et al., 2007). In that sense, increasing diversity of agricultural systems can also improve their adaptive capacity.

V.2. Increasing the adaptive capacity of agricultural systems

Cited mainly in robustness, vulnerability and resilience literature, adaptive capacity refers to the ability of agricultural systems to transform their nature or structure to cope with an ever-changing environment (Milestad et al., 2012). It focuses on ensuring sufficient room for maneuver, identifying transition capabilities and extending the degrees of freedom of agricultural systems. More often emphasized in livestock than in cropping systems (Blanc et al., 2010), adaptive capacity can be improved at different levels and in biological, technical and organizational components.

Applied to biological components, adaptive capacity has been widely discussed in robustness literature as a key breeding goal for animal breeding (Knap, 2005). It refers to the ability of animals to adjust their behavior to exogenous constraints. For example, the adaptive capacity of dairy cows may refer to their ability to mobilize body reserves during specific periods in order to support milk production. Blanc et al. (2010) showed that animals in extensive livestock systems are frequently adjusting their behavior and physiological responses to cope with low feed intake periods. Such ability to adjust their behavior varies between breeds and highlights their ability to produce and maintain their reproduction in an unstable environment. Various research programs have focused on increasing these properties in various plants and animals (Knap et al. 2005; ten Napel et al. 2006) but some authors have underlined a potential trade-off between intrinsic adaptive capacity and the productivity of livestock systems (Sabatier et al. 2015).

On a larger scale, improving the adaptive capacity of agricultural systems can be based on improvements in the design of agricultural systems and the implementation of technical components designed to help farmers to adjust day-to-day operations. For example, design can rely on the choice of renewable materials, such as bedding material, feeder type for livestock and new fertilizers and decision support tools in crops to prevent abiotic or biotic risks. Several tools are already available to inform farmers about pests outbreaks, soil water availability or nitrogen nutrition index and farmers can opportunistically respond to variability by adjusting pesticide, irrigation or fertilizer uses (Mulla, 2013). In livestock systems, increasing adaptive capacity can also refer to organizational management and to the adaptation in time and space of feed management to secure feed supply, especially in grassland systems that can be highly sensitive to drought periods (Mosnier et al., 2009; Tichit et al., 2004). By introducing more flexibility in agricultural systems, these technical and decision making components emerge as important characteristics of agricultural systems which consciously or automatically adjust options to reliable clues from the environment in which they operate (Rodriguez et al., 2011).

Beyond farm scale, adaptive capacity can also be improved through collective actions between stakeholders that voluntarily share their goals and production tools. Ireland and Thomalla (2011) showed that collective action between farms can promote the establishment

of social networks and enhance the ability of local stakeholders to cope with a changeable environment. It may also increase their financial resources which can be used during times of hardship. These new forms of cooperation between farms are also helping them to establish new relationships with downstream industries and to adapt better to changes in market context.

VI. Conclusion

The context of increasing uncertainty induces major challenges for agricultural systems. The need for more sustainable agricultural systems in an increasingly changeable environment implies a shift from the aim of maximizing agricultural outputs in a non-disturbed environment to the aim of maintaining desired levels of outputs in a context of unpredictable perturbations. For agronomists, it entails the need for a better characterization and quantification of the ability of agricultural systems to cope with unpredictable changes. A literature review of stability, robustness, vulnerability and resilience highlighted several differences and complementarities between these four concepts. Depending on the system's scale, the type of agricultural output studied and the kind of perturbation, each concept can be meaningful and provide insights to better characterize agricultural systems behavior in the face of perturbations. This literature review also provided insights into the various methods available to quantify these properties in agricultural systems, from the analysis of the variability and resistance of

agricultural outputs to multi-scale and indicator-based assessments. Based on this literature, increasing diversity and adaptive capacity of agricultural systems emerge as key drivers for increasing the ability of agricultural systems to cope with different types of perturbation. However, further empirical studies are still needed to test and validate these methods and results in various contexts and across various spatial and temporal scales. Further research is needed to work out to what extent, and based on which value judgements, the urge for more stable, more robust, less vulnerable or more resilient agricultural production systems is moving research towards a course of breeding stable cultivars, towards breeding robust cows, towards protection and exposure avoidance, or towards resilience and adaptation. Of particular interest are the trade-offs involved.

VII. References

Abson, D. J., Fraser, E. D. G., and Benton, T. G. (2013). Landscape diversity and the resilience of agricultural returns: a portfolio analysis of land-use patterns and economic returns from lowland agriculture. Agriculture & Food Security 2, 2. doi:10.1186/2048-7010-2-2

Adger, W. N. (2006). Vulnerability. Global environmental change 16, 268-281. doi:10.1016/j.gloenvcha.2006.02.006

Altieri, M., and Nicholls, C. (2004). "Biodiversity and pest management in agroecosystems," Haworth Press, New York. doi:10.2134/jeq2005.0729

Altieri, M., Nicholls, C., Henao, A., and Lana, M. (2015). Agroecology and the design of climate change-resilient farming systems. Agronomy for Sustainable Development 35, 869-890. doi:10.1007/s13593-015-0285-2

Anderies, J. M., Walker, B. H., and Kinzig, A. P. (2006). Fifteen weddings and a funeral: case studies and resilience-based management. Ecology and society 11, 21. [online] URL: http://www.ecologyandsociety.org/vol11/iss1/art21/

Annicchiarico, P. (2002). "Genotype x environment interactions: challenges and opportunities for plant breeding and cultivar recommendations". In: FAO Plant Production and Protection Paper (FAO), no. 174, Food & Agriculture Org., Rome (Italy)

Astigarraga, L., and Ingrand, S. (2011). Production flexibility in extensive beef farming systems. Ecology and Society 16, 7. [online] URL: http://www.ecologyandsociety.org/vol16/iss1/art7/

Berzsenyi, Z., Győrffy, B., and Lap, D. (2000). Effect of crop rotation and fertilisation on maize and wheat yields and yield stability in a long-term experiment. European Journal of Agronomy 13, 225-244. doi:10.1016/S1161-0301(00)00076-9

Blaikie, P., Cannon, T., Davis, I., and Wisner, B. (1994). "At risk : Natural hazards, people's vulnerability and disasters," Routledge, New York. doi:10.1111/j.1475-4959.2007.00244_3.x

Blanc, F., Dumont, B., Brunschwig, G., Bocquier, F., and Agabriel, J. (2010). Robustesse, flexibilité, plasticité: des processus adaptatifs révélés dans les systèmes d'élevage extensifs de ruminants. Productions animales 23, 65-80.

Bockstaller, C., Guichard, L., Keichinger, O., Girardin, P., Galan, M.-B., and Gaillard, G. (2009). Comparison of methods to assess the sustainability of agricultural systems: a review. In "Sustainable Agriculture" (E. Lichtfouse, M. Navarrete, P. Debaeke, V. Souchere, C. Alberola, eds.), pp. 769-784. Springer. doi:10.1051/agro:2008058

Brancourt-Hulmel, M. (1999). Expliquer l'interaction génotype/milieu par des génotypes révélateurs chez le blé tendre d'hiver, thèse de biologie, Ensar, Rennes.

Brand, F. S., and Jax, K. (2007). Focusing the meaning (s) of resilience: resilience as a descriptive concept and a boundary object. Ecology and Society 12, 23. [online] URL: http://www.ecologyandsociety.org/vol12/iss1/art23/

Brisson, N., Gate, P., Gouache, D., Charmet, G., Oury, F.-X., and Huard, F. (2010). Why are wheat yields stagnating in Europe? A comprehensive data analysis for France. Field Crops Research 119, 201-212. doi:10.1016/j.fcr.2010.07.012

Brooks, N., and Adger, W. N. (2005). Assessing and enhancing adaptive capacity. In "Adaptation Policy Frameworks for Climate Change: Developing Strategies, Policies and Measures" (B. Lim, E. Spanger-Siegfried, eds.), pp. 165-182. Cambridge University Press, Cambridge.

Cabell, J. F., and Oelofse, M. (2012). An Indicator Framework for Assessing Agroecosystem Resilience. Ecology & Society 17(1): 18. doi:10.5751/ES-04666-170118

Callo-Concha, D., and Ewert, F. (2014). Using the concepts of resilience, vulnerability and adaptability for the assessment and analysis of agricultural systems. Change and Adaptation in Socio-Ecological Systems 1. doi:10.2478/cass-2014-0001

Carlisle, L. (2014). Diversity, flexibility, and the resilience effect: lessons from a social-ecological case study of diversified farming in the northern Great Plains, USA. Ecology and Society 19(3): 45. doi:10.5751/ES-06736-190345

Carlson, J. M., and Doyle, J. (2002). Complexity and robustness. Proceedings of the National Academy of Sciences 99, 2538-2545. doi:10.1073/pnas.012582499

Carpenter, S., Walker, B., Anderies, J. M., and Abel, N. (2001). From metaphor to measurement: resilience of what to what? Ecosystems 4, 765-781. doi:10.1007/s10021-001-0045-9

Carpenter, S. R., Arrow, K. J., Barrett, S., Biggs, R., Brock, W. A., Crépin, A.-S., Engström, G., Folke, C., Hughes, T. P., and Kautsky, N. (2012). General resilience to cope with extreme events. Sustainability 4(12), 3248-3259. doi:10.3390/su4123248

Carpenter, S. R., and Brock, W. A. (2008). Adaptive capacity and traps. Ecology and society 13(2), 40. [online] URL: http://www.ecologyandsociety.org/vol13/iss2/art40/

Casadebaig, P., Trépos, R., Picheny, V., Langlade, N. B., Vincourt, P., and Debaeke, P. (2014). Increased genetic diversity improves crop yield stability under climate variability: a computational study on sunflower. doi:arXiv:1403.2825

Cernay, C., Ben-Ari, T., Pelzer, E., Meynard, J.-M., and Makowski, D. (2015). Estimating variability in grain legume yields across Europe and the Americas. Scientific reports 5:11171. doi:10.1038/srep11171

Darnhofer, I. (2010). Strategies of family farms to strengthen their resilience. Environmental Policy and Governance 20(4), 212-222. doi:10.1002/eet.547

Darnhofer, I., Bellon, S., Dedieu, B., and Milestad, R. (2010). Adaptiveness to enhance the sustainability of farming systems. Agronomy Sustainable Development 30, 545-555. 10.1002/eet.547

David, C., Mundler, P., Demarle, O., and Ingrand, S. (2010). Long-term strategies and flexibility of organic farmers in southeastern France. International journal of agricultural sustainability 8(4), 305-318. doi:10.3763/ijas.2010.0497

de Goede, D. M., Gremmen, B., and Blom-Zandstra, M. (2013). Robust agriculture: Balancing between vulnerability and stability. NJAS - Wageningen Journal of Life Sciences 64–65, 1-7.

doi:10.1016/j.njas.2012.03.001

Devictor, V., and Jiguet, F. (2007). Community richness and stability in agricultural landscapes: the importance of surrounding habitats. Agriculture, ecosystems & environment 120, 179-184.

doi:10.1016/j.agee.2006.08.013

Di Falco, S., and Perrings, C. (2003). Crop genetic diversity, productivity and stability of agroecosystems. A theoretical and empirical investigation. Scottish Journal of Political Economy 50, 207-216. doi:10.1111/1467-9485.5002006

Dourmad, J., Canario, L., Gilbert, H., Merlot, E., Quesnel, H., and Prunier, A. (2010). Evolution of animal performance and robustness in pig farms. Productions Animales 23, 53-64.

Downing, T. E., Patwardhan, A., Klein, R. J., and Mukhala, E. (2005). Assessing vulnerability for climate adaptation. In: "Adaptation Policy Frameworks for Climate Change: Developing Strategies, Policies and Measures" (B. Lim, E. Spanger-Siegfried, eds.), pp. 67-90. Cambridge University Press, New York.

Edwards-Jones, G. (2006). Modelling farmer decision-making: concepts, progress and challenges. Animal science 82, 783-790. doi:10.1017/ASC2006112

Enjolras, G., Capitanio, F., Aubert, M., and Adinolfi, F. (2014). Direct payments, crop insurance and the volatility of farm income. Some evidence in France and in Italy. Mediterranean journal of economics, agriculture and environment 13, 31-40.

Fèvre, E. M., Bronsvoort, B. M. d. C., Hamilton, K. A., and Cleaveland, S. (2006). Animal movements and the spread of infectious diseases. Trends in microbiology 14, 125-131. doi:10.1016/j.tim.2006.01.004

Folke, C., Carpenter, S., Elmqvist, T., Gunderson, L., Holling, C. S., and Walker, B. (2002). Resilience and sustainable development: building adaptive capacity in a world of transformations. AMBIO: A journal of the human environment 31, 437-440. doi:10.1579/0044-7447-31.5.437

Folke, C., Carpenter, S. R., Walker, B., Scheffer, M., Chapin, T., and Rockström, J. (2010). Resilience thinking : integrating resilience, adaptability and transformability. Ecology and Society 15(4), 20. [online] URL: http://www.ecologyandsociety.org/vol15/iss4/art20/

Fowlkes, W. Y., Creveling, C. M., and Derimiggio, J. (1995). "Engineering methods for robust product design: using Taguchi methods in technology and product development," Addison-Wesley Reading. 432 p.

Gallopín, G. C. (2006). Linkages between vulnerability, resilience, and adaptive capacity. Global Environmental Change 16, 293-303. doi:10.1016/j.gloenvcha.2006.02.004

Gbetibouo, G. A., Ringler, C., and Hassan, R. (2010). Vulnerability of the South African farming sector to climate change and variability: An indicator approach. Natural Resources Forum 34, 175-187. doi:10.1111/j.1477-8947.2010.01302.x

Govaerts, B., Sayre, K. D., and Deckers, J. (2005). Stable high yields with zero tillage and permanent bed planting? Field crops research 94, 33-42. doi:10.1016/j.fcr.2004.11.003

Grimm, V., and Wissel, C. (1997). Babel, or the ecological stability discussions: an inventory and analysis of terminology and a guide for avoiding confusion. Oecologia 109, 323-334. doi:10.1007/s004420050090

Gu, Z., Steinmetz, L. M., Gu, X., Scharfe, C., Davis, R. W., and Li, W.-H. (2003). Role of duplicate genes in genetic robustness against null mutations. Nature 421, 63-66. doi:10.1038/nature01198

Gunderson, L. H., Holling, C. S., and Peterson, G. D. (2002). Surprises and sustainability: cycles of renewal in the Everglades. In: "Panarchy: understanding transformations in human and natural systems" (L.H. Gunderson, C.S. Holling, eds.). Island Press, Washington, DC, USA, 315-332.

Hector, A., Schmid, B., Beierkuhnlein, C., Caldeira, M.C., Diemer, M., Dimitrakopoulos, P.G., Finn, J.A., Freitas, H., Giller, P.S., Good, J., Harris, R., Hogberg, P., Huss-Danell, K., Joshi, J., Jumpponen, A., Korner, C., Leadley, P.W., Loreau, M., Minns, A., Mulder, C.P.H., O'Donovan, G., Otway, S.J., Pereira, J.S., Prinz, A., Read, D.J., Scherer-Lorenzen, M., Schulze, E.D., Siamantziouras, A.S.D., Spehn, E.M., Terry, A.C., Troumbis, A.Y., Woodward, F.I., Yachi, S., Lawton, J.H. (1999). Plant diversity and productivity experiments in European grasslands. Science 286, 1123-1127. doi:10.1126/science.286.5442.1123

Herrero-Medrano, J., Mathur, P., Napel, J. t., Rashidi, H., Alexandri, P., Knol, E., and Mulder, H. (2015). Estimation of genetic parameters and breeding values across challenged environments to select for robust pigs. Journal of Animal Science 93, 1494-1502. doi:10.2527/jas.2014-8583

Hoisington, D., Khairallah, M., Reeves, T., Ribaut, J.-M., Skovmand, B., Taba, S., and Warburton, M. (1999). Plant genetic resources: What can they contribute toward increased crop productivity? Proceedings of the National Academy of Sciences 96, 5937-5943. doi:10.1073/pnas.96.11.5937

Holling, C. (1996). Engineering resilience versus ecological resilience. In: “Engineering Within Ecological Constraints” (National Academy of Engineering). Foundations of ecological resilience, 31-45.

Holling, C. S. (1973). Resilience and stability of ecological systems. Annual review of ecology and systematics, 1-23. doi:10.1146/annurev.es.04.110173.000245

Holling, C. S. (2005). From complex regions to complex worlds. Ecology and society 9(1):11. [online] URL: http://www.ecologyandsociety.org/vol9/iss1/art11/

Holt-Giménez, E. (2002). Measuring farmers' agroecological resistance after Hurricane Mitch in Nicaragua: a case study in participatory, sustainable land management impact monitoring. Agriculture, Ecosystems & Environment 93, 87-105. doi:10.1016/S0167-8809(02)00006-3

Huchet-Bourdon, M. (2011). Agricultural Commodity Price Volatility: An Overview, OECD Food, Agriculture and Fisheries Paper, No. 52, OECD Publishing. doi:10.1787/5kg0t00nrthc-en

Huyghe, C., De Vliegher, A., van Gils, B., and Peeters, A. (2014). Grasslands and herbivore production in Europe and effects of common policy. Quae Editions, 287 p.

Iglesias, A., and Quiroga, S. (2007). Measuring the risk of climate variability to cereal production at five sites in Spain. Climate Research 34, 47-57. doi:10.3354/cr034047

IPCC (2014). Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Part A: Global and Sectoral Aspects. Contribution of Working Group II to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press, Cambridge, UK/New York, NY.

Ireland, P., and Thomalla, F. (2011). The role of collective action in enhancing communities' adaptive capacity to environmental risk: an exploration of two case studies from Asia. PLoS currents 3. doi:10.1371/currents.RRN1279

Ives, A. R., and Carpenter, S. R. (2007). Stability and diversity of ecosystems. Science 317, 58-62. doi:10.1126/science.1133258

Jalan, J., and Ravallion, M. (1999). Are the poor less well insured? Evidence on vulnerability to income risk in rural China. Journal of Development Economics 58, 61-81. doi:10.1016/S0304-3878(98)00103-5

Jose, S. (2009). Agroforestry for ecosystem services and environmental benefits: an overview. Agroforestry systems 76, 1-10. doi:10.1007/s10457-009-9229-7

Justus, J. (2008). Complexity, diversity, and stability. In "A companion to the philosophy of biology" (S. Sarkar and A. Plutynski, eds.), pp. 321-350. Blackwell Publishing.

Keil, A., Zeller, M., Wida, A., Sanim, B., and Birner, R. (2008). What determines farmers' resilience towards ENSO-related drought? An empirical assessment in Central Sulawesi, Indonesia. Climatic Change 86, 291-307. doi:10.1007/s10584-007-9326-4

Kitano, H. (2004). Biological robustness. Nature Reviews Genetics 5, 826-837. doi:10.1038/nrg1471

Knap, P. W. (2005). Breeding robust pigs. Animal Production Science 45, 763-773. doi: 10.1071/EA05041

Lamichhane, J. R., Barzman, M., Booij, K., Boonekamp, P., Desneux, N., Huber, L., Kudsk, P., Langrell, S. R., Ratnadass, A., and Ricci, P. (2014). Robust cropping systems to tackle pests under climate change. A review. Agronomy for Sustainable Development 35, 443-459. doi:10.1007/s13593-014-0275-9

Lavorel, S. (1999). Ecological diversity and resilience of Mediterranean vegetation to disturbance. Diversity and Distributions 5, 3-13. doi:10.1046/j.1472-4642.1999.00033.x

Li, Y., Ye, W., Wang, M., and Yan, X. (2009). Climate change and drought: a risk assessment of crop-yield impacts. Climate research 39, 31-46. doi:10.3354/cr00797

Lin, B. B. (2011). Resilience in agriculture through crop diversification: adaptive management for environmental change. BioScience 61, 183-193. doi:10.1525/bio.2011.61.3.4

Lin, C.-S., Binns, M. R., and Lefkovitch, L. P. (1986). Stability analysis: where do we stand? Crop science 26(5), 894-900.

Luers, A. L., Lobell, D. B., Sklar, L. S., Addams, C. L., and Matson, P. A. (2003). A method for quantifying vulnerability, applied to the agricultural system of the Yaqui Valley, Mexico. Global Environmental Change 13, 255-267. doi:10.1016/S0959-3780(03)00054-2

Luo, Q., Bellotti, W., Williams, M., and Wang, E. (2009). Adaptation to climate change of wheat growing in South Australia: Analysis of management and breeding strategies. Agriculture, Ecosystems & Environment 129, 261-267. doi:10.1016/j.agee.2008.09.010

MacArthur, R. (1955). Fluctuations of animal populations and a measure of community stability. ecology 36, 533-536. doi:10.2307/1929601

MacGillivray, C., and Grime, J. (1995). Testing predictions of the resistance and resilience of vegetation subjected to extreme events. Functional Ecology 9(4), 640-649. doi:10.2307/2390156

Maracchi, G., Sirotenko, O., and Bindi, M. (2005). Impacts of Present and Future Climate Variability on Agriculture and Forestry in the Temperate Regions: Europe. Climatic Change 70, 117-135. doi:10.1007/1-4020-4166-7_6

Maronna, R., Martin, D., and Yohai, V. (2006). "Robust statistics," John Wiley & Sons, New York. doi:10.1002/0470010940

Mathevet, R., and Bousquet, F. (2014). "Résilience & environnement: penser les changements socio-écologiques," Buchet Chastel, Paris. ISBN: 2283027365

Maxwell, S. (1986). Farming systems research : hitting a moving target. World development 14, 65-77. doi:10.1016/0305-750X(86)90096-3

Mc Carthy, J., Canziani, O., Leary, N., Dokken, D., and White, K. (2001). Impacts, Adaptation and Vulnerability–Contribution of working group II to the third assessment report of the IPCC. Cambridge University Press.

McLeman, R., and Smit, B. (2006). Vulnerability to climate change hazards and risks: crop and flood insurance. The Canadian Geographer 50(2), 217-226. doi:10.1111/j.0008-3658.2006.00136.x

Mens, M. J., Klijn, F., de Bruijn, K. M., and van Beek, E. (2011). The meaning of system robustness for flood risk management. Environmental Science & Policy 14, 1121-1131. doi:10.1016/j.envsci.2011.08.003

Merks, J. W. M., Mathur, P. K., and Knol, E. F. (2012). New phenotypes for new breeding goals in pigs. animal 6, 535-543. doi: 10.1017/S1751731111002266

Metzger, M., Rounsevell, M., Acosta-Michlik, L., Leemans, R., and Schröter, D. (2006). The vulnerability of ecosystem services to land use change. Agriculture, Ecosystems & Environment 114, 69-85. doi:10.1016/j.agee.2005.11.025

Meynard, J.-M., Dedieu, B., and Bos, A. B. (2012). Re-design and co-design of farming systems. An overview of methods and practices. In "Farming Systems Research into the 21st century: The new dynamic" (I. Darnhofer, D. Gibbon, B. Dedieu, eds.), 405-429. Springer.

Milestad, R., Dedieu, B., Darnhofer, I., and Bellon, S. (2012). Farms and farmers facing change: The adaptive approach. In "Farming Systems Research into the 21st Century: The New Dynamic" (I. Darnhofer, D. Gibbon and B. Dedieu, eds.), 365-385. Springer.

Millennium Ecosystem Assessment, 2005. Ecosystems and Human Well-being: Synthesis. Island Press, Washington, DC.

Mishra, A. K., and Sandretto, C. L. (2002). Stability of farm income and the role of nonfarm income in US agriculture. Review of Agricultural Economics 24, 208-221. doi:10.2307/1349829

Moore, F. C., and Lobell, D. B. (2014). Adaptation potential of European agriculture in response to climate change. Nature Climate Change 4, 610-614. doi:10.1073/pnas.1409606112

Mosnier, C., Agabriel, J., Lherm, M., and Reynaud, A. (2009). A dynamic bio-economic model to simulate optimal adjustments of suckler cow farm management to production and market shocks in France. Agricultural Systems 102, 77-88. doi:10.1016/j.agsy.2009.07.003

Mulla, D. J. (2013). Twenty five years of remote sensing in precision agriculture: Key advances and remaining knowledge gaps. Biosystems Engineering 114, 358-371. doi:10.1016/j.biosystemseng.2012.08.009

Mumby, P. J., Chollett, I., Bozec, Y.-M., and Wolff, N. H. (2014). Ecological resilience, robustness and vulnerability: how do these concepts benefit ecosystem management? Current Opinion in Environmental Sustainability 7, 22-27. doi:10.1016/j.cosust.2013.11.021

Murphy, L. B. (1974). Coping, vulnerability, and resilience in childhood. In: “Coping and adaptation” (G.V. Coehlo, D.A. Hamburg, J.E. Adams, eds.), 69-100. New York.

National Research Council (2010). "Toward Sustainable Agricultural Systems in the 21st Century", The National Academies Press. 598 p. doi:10.17226/12832

Naylor, R. (2008). Managing food production systems for resilience. In "Principles of natural resource stewardship : resilience-based management in a changing world" (F. S. Chapin, G. P. Kofinas and C. Folke, eds.), pp. 259-280. Springer, New-York. doi:10.1007/978-0-387-73033-2

Nelson, D. R., Adger, W. N., and Brown, K. (2007). Adaptation to Environmental Change: Contributions of a Resilience Framework. Annual Review of Environment and Resources 32, 395-419. doi:10.1146/annurev.energy.32.051807.090348

O’Brien, K., Leichenko, R., Kelkar, U., Venema, H., Aandahl, G., Tompkins, H., Javed, A., Bhadwal, S., Barg, S., and Nygaard, L. (2004). Mapping vulnerability to multiple stressors: climate change and globalization in India. Global environmental change 14, 303-313. doi:10.1016/j.gloenvcha.2004.01.001

Olesen, J. E., Trnka, M., Kersebaum, K., Skjelvåg, A., Seguin, B., Peltonen-Sainio, P., Rossi, F., Kozyra, J., and Micale, F. (2011). Impacts and adaptation of European crop production systems to climate change. European Journal of Agronomy 34, 96-112. doi:10.1016/j.eja.2010.11.003

Østergård, H., Finckh, M. R., Fontaine, L., Goldringer, I., Hoad, S. P., Kristensen, K., Lammerts van Bueren, E. T., Mascher, F., Munk, L., and Wolfe, M. S. (2009). Time for a shift in crop production: embracing complexity through diversity at all levels. Journal of the Science of Food and Agriculture 89, 1439-1445. doi:10.1002/jsfa.3615

Paavola, J. (2008). Livelihoods, vulnerability and adaptation to climate change in Morogoro, Tanzania. Environmental Science & Policy 11, 642-654. doi:10.1016/j.envsci.2008.06.002

Parrott, L., and Meyer, W. S. (2012). Future landscapes: managing within complexity. Frontiers in Ecology and the Environment 10, 382-389. doi:10.1890/110082

Quinlan, A. E., Berbés-Blázquez, M., Haider, L. J., and Peterson, G. D. (2015). Measuring and assessing resilience: broadening understanding through multiple disciplinary perspectives. Journal of Applied Ecology. doi:10.1111/1365-2664.12550

Reidsma, P., and Ewert, F. (2008). Regional farm diversity can reduce vulnerability of food production to climate change. Ecology and Society 13, 38. [online] URL: http://www.ecologyandsociety.org/vol13/iss1/art38/

Reidsma, P., Ewert, F., Lansink, A. O., and Leemans, R. (2010). Adaptation to climate change and climate variability in European agriculture: the importance of farm level responses. European Journal of Agronomy 32, 91-102. doi:10.1016/j.eja.2009.06.003

Renting, H., Rossing, W. A. H., Groot, J. C. J., Van der Ploeg, J. D., Laurent, C., Perraud, D., Stobbelaar, D. J., and Van Ittersum, M. K. (2009). Exploring multifunctional agriculture. A review of conceptual approaches and prospects for an integrative transitional framework. Journal of Environmental Management 90, Supplement 2, S112-S123. doi:10.1016/j.jenvman.2008.11.014

Rodriguez, D., Power, B., Cox, H., Crimp, S., and Meinke, H. (2011). The intrinsic plasticity of farm businesses and their resilience to change. An Australian example. Field Crops Research 124, 157-170. doi:10.1016/j.fcr.2011.02.012

Sabaghnia, N., Karimizadeh, R., and Mohammadi, M. (2012). Genotype by environment interaction and stability analysis for grain yield of lentil genotypes. Žemdirbyst 99, 305-312.

Sabatier, R., Oates, L., Brink, G., Bleier, J., and Jackson, R. (2015). Grazing in an Uncertain Environment: Modeling the Trade-Off between Production and Robustness. Agronomy Journal 107, 257-264. doi:10.2134/agronj14.0357

Sabatier, R., Wiegand, K., and Meyer, K. (2013). Production and Robustness of a Cacao Agroecosystem: Effects of Two Contrasting Types of Management Strategies. PloS one 8, e80352. doi:10.1371/journal.pone.0080352

Sauvant, D., and Martin, O. (2010). Robustesse, rusticité, flexibilité, plasticité... les nouveaux critères de qualité des animaux et des systèmes d'élevage: définitions systémique et biologique des différents concepts. Productions animales 23, 5-9.

Scheffer, M., Carpenter, S. R., Lenton, T. M., Bascompte, J., Brock, W., Dakos, V., Van De Koppel, J., Van De Leemput, I. A., Levin, S. A., and Van Nes, E. H. (2012). Anticipating critical transitions. Science 338, 344-348. doi:10.1126/science.1225244

Schröter, D., Cramer, W., Leemans, R., Prentice, I. C., Araújo, M. B., Arnell, N. W., Bondeau, A., Bugmann, H., Carter, T. R., and Gracia, C. A. (2005). Ecosystem service supply and vulnerability to global change in Europe. Science 310, 1333-1337. doi:10.1126/science.1115233

Silva, B. K. N., and Lucio, P. S. (2014). Indicator of Agriculture Vulnerability to Climatic Extremes. A Conceptual Model with Case Study for the Northeast Brazil. Atmospheric and Climate Sciences 4, 334. doi:10.4236/acs.2014.42034

Simelton, E., Fraser, E. D. G., Termansen, M., Forster, P. M., and Dougill, A. J. (2009). Typologies of crop-drought vulnerability: an empirical analysis of the socio-economic factors that influence the sensitivity and resilience to drought of three major food crops in China (1961–2001). Environmental Science & Policy 12, 438-452. doi:10.1016/j.envsci.2008.11.005

Standish, R. J., Hobbs, R. J., Mayfield, M. M., Bestelmeyer, B. T., Suding, K. N., Battaglia, L. L., Eviner, V., Hawkes, C. V., Temperton, V. M., Cramer, V. A., Harris, J. A., Funk, J. L., and Thomas, P. A. (2014). Resilience in ecology: Abstraction, distraction, or where the action is? Biological Conservation 177, 43-51. doi:10.1016/j.biocon.2014.06.008

Star, L., Ellen, E., Uitdehaag, K., and Brom, F. (2008). A plea to implement robustness into a breeding goal: poultry as an example. Journal of Agricultural and Environmental Ethics 21, 109-125. doi:10.1007/s10806-007-9072-7

Sternberg, T. (2012). Chinese drought, bread and the Arab Spring. Applied Geography 34, 519-524. doi:10.1016/j.apgeog.2012.02.004

Taguchi, G., and Clausing, D. (1990). Robust quality. Harvard Business Review 68, 65-75.

ten Napel, J., Bianchi, F. J. J. A., and Bestman, M. W. P. (2006). Utilising intrinsic robustness in

agricultural production systems. In "Invention for a sustainable development of agriculture", pp. 32-54. TransForum, Zoetermeer.

ten Napel, J., van der Veen, A. A., Oosting, S. J., and Koerkamp, P. W. G. G. (2011). A conceptual approach to design livestock production n systems for robustness to enhance sustainability. Livestock Science 139, 150-160. doi:10.1016/j.livsci.2011.03.007

Tendall, D., Joerin, J., Kopainsky, B., Edwards, P., Shreck, A., Le, Q., Kruetli, P., Grant, M., and Six, J. (2015). Food system resilience: defining the concept. Global Food Security 6, 17-23. doi:10.1016/j.gfs.2015.08.001

Tengö, M., and Hammer, M. (2003). Management practices for building adaptive capacity: a case from northern Tanzania, In: "Navigating Social-Ecological Systems: Building Resilience for Complexity and Change" (F.Berkes, J. Colding, C. Folke, eds.), Chapter 6. Cambridge University Press, Cambridge, UK.

Tichit, M., Hubert, B., Doyen, L., and Genin, D. (2004). A viability model to assess the sustainability of mixed herds under climatic uncertainty. Anim. Res. 53, 405-417. doi:10.1051/animres:2004024

Tilman, D., Cassman, K. G., Matson, P. A., Naylor, R., and Polasky, S. (2002). Agricultural sustainability and intensive production practices. Nature 418, 671-677. doi:10.1038/nature01014

Tilman, D., Reich, P. B., and Knops, J. M. (2006). Biodiversity and ecosystem stability in a decade-long grassland experiment. Nature 441, 629-632. doi:10.1038/nature04742

Tooker, J. F., and Frank, S. D. (2012). Genotypically diverse cultivar mixtures for insect pest management and increased crop yields. Journal of Applied Ecology 49, 974-985. doi:10.1111/j.1365-2664.2012.02173.x

Trnka, M., Olesen, J. E., Kersebaum, K. C., Skjelvåg, A. O., Eitzinger, J., Seguin, B., Peltonen-Sainio, P., Rötter, R., Iglesias, A., and Orlandini, S. (2011). Agroclimatic conditions in Europe under climate change. Global Change Biology 17, 2298-2318. doi:10.1111/j.1365-2486.2011.02396.x

Turner, B. L., Kasperson, R. E., Matson, P. A., McCarthy, J. J., Corell, R. W., Christensen, L., Eckley, N., Kasperson, J. X., Luers, A., Martello, M. L., Polsky, C., Pulsipher, A., and Schiller, A. (2003). A framework for vulnerability analysis in sustainability science. Proc Natl Acad Sci U S A 100, 8074-9. doi:10.1073/pnas.1231335100

Turner, M. G., Romme, W. H., Gardner, R. H., O'Neill, R. V., and Kratz, T. K. (1993). A revised concept of landscape equilibrium: disturbance and stability on scaled landscapes. Landscape Ecology 8, 213-227. doi:10.1007/BF00125352

van der Leeuw, S. E., and Aschan-Leygonie, C. (2000). A long-term perspective on resilience in socio-natural systems. In "System shocks - system resilience" (S. F. Institute, ed.), Abisko, Sweden.

Verhagen, J., ten Napel, J., and Hengsdijk, H. (2010). Robust and resilient agriculture. In "Exploring the potential of high technological and eco-efficient agriculture" (C. de Visser, H. Hengsdijk, M. K. van Ittersum, G. Meijerink, A. van den Pol and M. Slingerland, eds.), Wageningen: Applied Plant Research, 99-105.

Wagner, A. (2008). Robustness and evolvability: a paradox resolved. Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences 275, 91-100. doi:10.1098/rspb.2007.1137

Walker, B., and Salt, D. (2006). In the loop : phases, cycles, and scales-adaptive cycles and how systems change. In "Resilience thinking: Sustaining Ecosystems and People in a Changing World" (B. Walker, D. Salt, eds.), 74-96. Island Press.

Watts, M. J., and Bohle, H. G. (1993). Hunger, famine and the space of vulnerability. GeoJournal 30(2), 117-125. doi:10.1007/BF00808128

Wilhelmi, O. V., and Wilhite, D. A. (2002). Assessing vulnerability to agricultural drought: a Nebraska case study. Natural Hazards 25, 37-58. doi:10.1023/A:1013388814894

Windig, J. J., Calus, M. P. L., Beerda, B., and Veerkamp, R. F. (2006). Genetic Correlations Between Milk Production and Health and Fertility Depending on Herd Environment. Journal of Dairy Science 89, 1765-1775. doi:10.3168/jds.S0022-0302(06)72245-7

Winson, C. (1932). Report on a method for measuring the resilience of wool. Journal of the Textile Institute Transactions 23, T386-T393. doi:10.1080/19447023208661565

Wiréhn, L., Danielsson, Å., and Neset, T.-S. S. (2015). Assessment of composite index methods for agricultural vulnerability to climate change. Journal of Environmental Management 156, 70-80. doi:10.1016/j.jenvman.2015.03.020

Wu, H., and Wilhite, D. A. (2004). An operational agricultural drought risk assessment model for Nebraska, USA. Natural Hazards 33, 1-21. doi:10.1023/B:NHAZ.0000034994.44357.75

Chapitre 2 : Le concept de la robustesse appliqué à un large réseau de parcelles de blé tendre, présentation des données d'enquêtes mobilisées

Compte tenu de son importance alimentaire, commerciale et industrielle, le blé tendre tient une place particulière dans le contexte agricole français. Mais les producteurs sont aujourd'hui exposés à des aléas de plus en plus fréquents, notamment du fait des conséquences du changement climatique. En particulier, ils doivent faire face à une variabilité interannuelle des conditions météorologiques qui augmente, ce qui n'est pas sans conséquence pour les rendements de leurs cultures. En parallèle, l'exigence des citoyens pour une réduction de l'usage des pesticides constitue un enjeu important pour les agriculteurs. Ces deux défis constitueront deux cadres d'application du concept de robustesse tel qu'il a été défini dans le chapitre précédent. Dans un premier temps, nous analyserons la robustesse du rendement du blé tendre face aux perturbations abiotiques (Section 2). Puis, la robustesse des systèmes de culture face aux perturbations biotiques sera étudiée à partir de la variabilité des usages de fongicides sur le blé (Section 3). Dans ce chapitre, nous présentons le jeu de données que nous avons mobilisé pour ces deux cadres d'analyse de la robustesse[3].

[3] Pour la mise à disposition des données, ainsi que leur actualisation au fil du temps, nous remercions les services d'Agrosolutions. Plus particulièrement, ces remerciements s'adressent à Martin Lechenet, Guillaume Py, Damien Valour, Simon Lefebvre, Laeticia De Sousa, Axel Olivier et Delphine Tailliez-Lefebvre. Nous remercions également l'ensemble des agriculteurs et les conseillers du réseau DEPHY pour leur engagement dans ce projet et leur accord pour diffuser les résultats de leurs démarches de réduction des pesticides.

Le concept de la robustesse appliqué à un large réseau de parcelles de blé tendre : présentation des données d'enquêtes mobilisées

I. Le réseau DEPHY

Initié en 2008 par le Ministère en charge de l'agriculture, le Plan Ecophyto s'est traduit par la mise en place de plusieurs actions à destination des agriculteurs et des professionnels du monde agricole. Parmi ces actions, l'une d'elles concernait la mise en place d'un réseau de « fermes pilotes » sur le territoire français, appelé réseau DEPHY. Amorcé en 2009, ce dernier vise à développer, mutualiser et diffuser les expériences de changements de pratiques et de mise en place de systèmes de culture permettant de réduire l'usage des produits phytosanitaires. Ce réseau est articulé autour de trois objectifs complémentaires (Ecophyto, 2013) :

1. **D**émontrer que réduire l'utilisation de produits phytopharmaceutiques est possible,
2. **E**xpérimenter des systèmes économes en produits phytopharmaceutiques,
3. **P**roduire des références sur les systèmes économes en produits p**HY**tosanitaires.

Pour remplir ces trois objectifs, le réseau DEPHY s'appuie sur trois blocs complémentaires. Le premier s'organise autour d'un réseau d'exploitations agricoles (dispositif FERME) qui rassemble plus de 2600 exploitations en 2016, engagées dans une démarche volontaire de réduction de l'usage de pesticides. Ces exploitations couvrent l'ensemble des filières agricoles et sont réparties sur l'ensemble du territoire national, outre-mer compris. Le deuxième bloc se structure autour d'un réseau de sites expérimentaux (dispositif EXPE) qui réunit 41 porteurs de projets répartis sur 170 sites. Ce dispositif a pour objectif de concevoir, tester et évaluer des systèmes de culture visant une forte réduction de l'usage des produits phytosanitaires afin d'en faciliter le transfert dans les exploitations agricoles. Enfin, le troisième bloc s'articule autour d'un système d'information (dispositif AGROSYST) dédié à la gestion, au partage et à la valorisation des références acquises par les deux premiers dispositifs.

Pour cette étude, nous nous sommes appuyés sur les données du dispositif FERME. Les 2600 exploitations agricoles qui le composent sont regroupées dans environ 220 groupes d'agriculteurs et couvrent sept types de productions : grandes cultures, polyculture-élevage, viticulture, arboriculture fruitière, productions légumières, horticulture et cultures tropicales (Figure 8). Les agriculteurs participants à ce dispositif n'engagent cependant pas la totalité de leur parcellaire. Une partie seulement de leur sole est dédiée à ce dispositif avec la mise en place de nouvelles pratiques pour réduire l'utilisation de pesticides.

L'animation et la coordination de ce réseau FERME à l'échelle nationale est gérée par la Cellule d'Animation Nationale (CAN) qui regroupe plusieurs experts par filière et des « Ingénieurs Réseau » (IR). Ces derniers sont chargés d'accompagner les agriculteurs engagés dans le projet ECOPHYTO à atteindre leurs objectifs de réduction des pesticides. Chaque IR accompagne un groupe composé en moyenne de 10 agriculteurs. L'accompagnement des agriculteurs dans l'évolution de leurs systèmes et l'atteinte de leurs objectifs associe des rencontres individuelles et des regroupements collectifs afin de favoriser les échanges au sein du groupe. Différents partenaires agricoles sont impliqués dans ce dispositif selon le territoire

et le type de production concernés : coopératives agricoles, chambres d'agriculture, CIVAM, FREDON, etc.

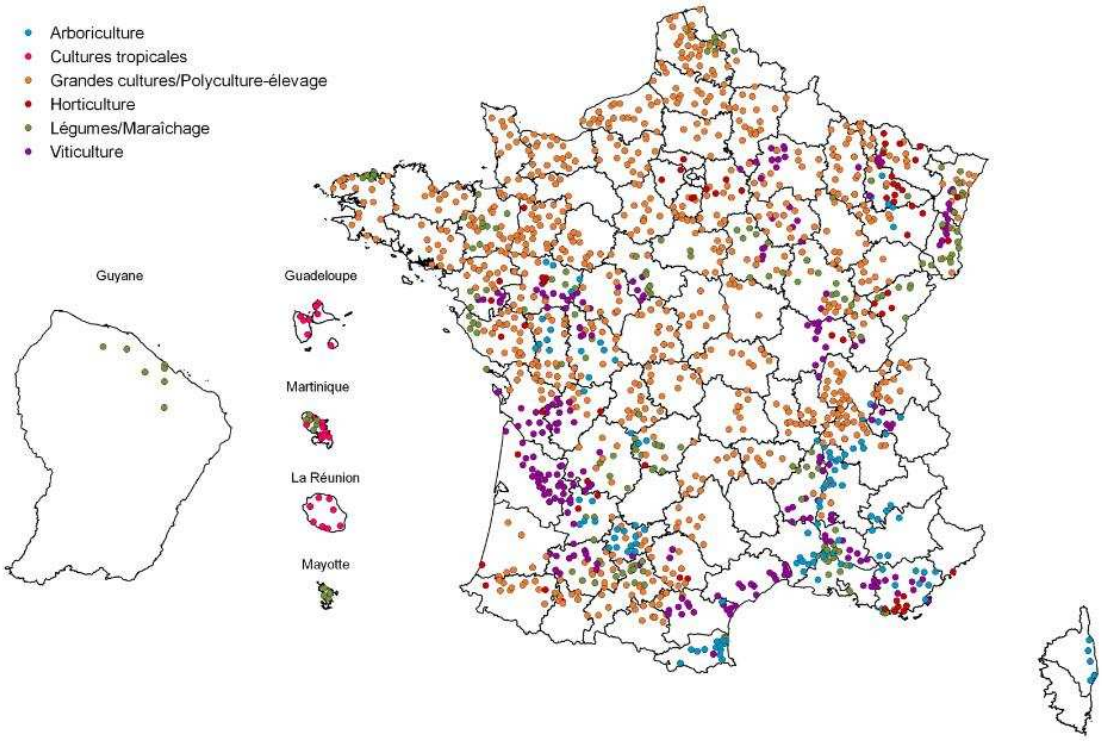


Figure 8 : Localisation des exploitations agricoles engagées dans le réseau DEPHY-FERMES en août 2016 (Source : Cellule d'Animation Nationale du réseau DEPHY)

II. Présentation du sous-réseau FERMEcophyto

Au sein du dispositif FERME, l'union de coopératives InVivo a mis en place un système de centralisation des données récoltées chez 325 agriculteurs faisant partis des groupes animés par 34 coopératives adhérentes (Figure 9). FERMEcophyto est le nom donné par InVivo à ce sous-réseau du dispositif FERME.

Depuis 2011, cette base de données centralise de nombreuses informations sur plus de 35 000 hectares et cinq types de production (grandes cultures, polyculture-élevage, viticulture, arboriculture et cultures légumières) : caractéristiques de l'exploitation et des parcelles, description de la conduite culturale et des rotations, performances agricoles **(Tableau 2**). Grâce au large déploiement de ces 325 exploitations sur l'ensemble du territoire français, ces données représentent un capital d'informations extrêmement riche et intéressant à analyser. L'un des principaux avantages de FERMEcophyto par rapport au reste du réseau DEPHY est la finesse du niveau d'information retenu. En effet, alors que l'information est synthétisée à l'échelle du système de culture pour le reste du réseau DEPHY, les caractéristiques des 15 000 parcelles agricoles sur la période 2011-2014 sont accessibles dans le cas de FERMEcophyto. Ces données permettent donc d'analyser beaucoup plus finement la variabilité temporelle des performances agricoles et donc leur robustesse face à différents types de perturbations.

En 2015, le nombre de parcelles enquêtées dans le réseau FERMEcophyto s'élevait à 15 257 parcelles réparties sur quatre années et sur 325 exploitations agricoles. En moyenne, ce sont donc 3 800 parcelles qui sont enquêtées chaque année.

Figure 9 : Carte des principales coopératives adhérentes au groupe InVivo et engagées dans le cadre du sous-réseau FERMEcophyto

Les parcelles sélectionnées par les agriculteurs du réseau FERMEcophyto sont généralement sélectionnées de manière homogène et constituent pour chaque exploitation un échantillon d'un « système de culture », c'est-à-dire un ensemble de parcelles cultivées avec des modalités techniques homogènes (même conduite culturale et même succession culturale sur les différentes parcelles). Par extension, nous avons considéré que les 325 échantillons d'exploitations du réseau FERMEcophyto représentent autant d'échantillons de systèmes de culture. Nous utiliserons donc dans la suite de cette thèse les termes « système de culture » et « exploitation agricole » de manière interchangeable.

Sur l'ensemble des 15 257 parcelles enquêtées, le blé tendre est l'espèce la plus représentée avec 3 660 parcelles (24 % du total). On retrouve des parcelles de blé tendre dans 275 exploitations différentes, signifiant que seulement 50 exploitations n'ont pas déclaré de parcelles de blé tendre dans le cadre de ce dispositif. Toutefois, en fonction de leur date d'inscription dans ce réseau, les exploitations ne présentent pas toutes le même nombre de parcelles, ni même le même nombre d'années enquêtées. Or pour étudier la robustesse des performances, il nous fallait pouvoir mesurer la variabilité interannuelle de ces performances et donc disposer de plusieurs années d'enquêtes par exploitation. C'est pourquoi, sur les 275 exploitations où des parcelles de blé tendre étaient renseignées, nous n'avons retenu que les exploitations pour lesquelles nous disposions d'au moins 3 années d'enquêtes, soit 145 exploitations (Figure 10). La répartition spatiale de ces exploitations est présentée dans la Figure 11.

Tableau 2 : Liste des variables documentées dans le réseau FERMEcophyto

Types de variables	Variables	Description des variables
Caractéristiques de l'exploitation	**Localisation**	Coordonnées géographiques (longitude, latitude)
	Surface totale	Nombre d'hectares
	Surface engagée	Nombre d'hectares engagés dans le plan FERMEcophyto
	Main d'œuvre	Nombre d'UTH (Unités de Travail Humain) disponible sur l'exploitation
	Filière	Type de production sur l'exploitation (grandes cultures, polyculture-élevage, viticulture, arboriculture, maraîchage)
	Prairies	Nombre d'hectares de prairies permanentes sur l'exploitation
	Matériel agricole	Adhésion à une CUMA (oui/non), puissance des tracteurs, matériel répertorié (semoir, herse, épandeur, …)
Caractéristiques des parcelles	**Localisation**	Nom de la commune sur laquelle se situe la parcelle
	Surface	Nombre d'hectares
	Culture récoltée	Nom de l'espèce cultivée
	Type de sol	Texture du sol superficiel et du sous-sol (limon, argileux, sableux, argilo-calcaire, …), profondeur totale et profondeur d'enracinement (cm), teneur en cailloux (%), présence de drains (oui/non)
Description de la conduite culturale	**Variété**	Nom de la variété cultivée
	Semis	Date et densité de semis (kg/ha), profondeur de semis (cm)
	Irrigation	Oui/Non, volume utilisé (m^3/ha)
	Fertilisation	Dose totale d'azote, de phosphore, de potassium et de soufre (kg/ha), nombre de fractionnement et dates des apports
	Travail du sol	Date des opérations et outils utilisés (labour, déchaumage, herse …)
	Protection phytosanitaire	IFT Total, IFT Herbicides, IFT Fongicides, IFT Insecticides, IFT Molluscicides, IFT Régulateurs, IFT Traitement de semences
Description de la rotation	**Anté-précédent**	Espèce cultivée sur la parcelle l'année n-2
	Précédent	Espèce cultivée sur la parcelle l'année n-1
	Rotation	Succession d'espèces dans la rotation
	CIPAN	Présence de Cultures Intermédiaires Pièges A Nitrate avant l'implantation de la culture (espèce utilisée), date d'implantation et de destruction
	Résidus	Devenir des résidus du précédent (enfouis/exportés)
Performances agricoles	**Rendement**	Rendement objectif et rendement obtenu (q/ha)
	Charges	Charges opérationnelles : coûts des semences, des engrais, de l'irrigation, des produits phytosanitaires.
	Energie	Consommation d'énergie (MJ/ha)
	GES	Emissions de Gaz à Effet de Serre (g CO2/ha)
	Temps de travail	Nombre d'heures de travail (h/ha)

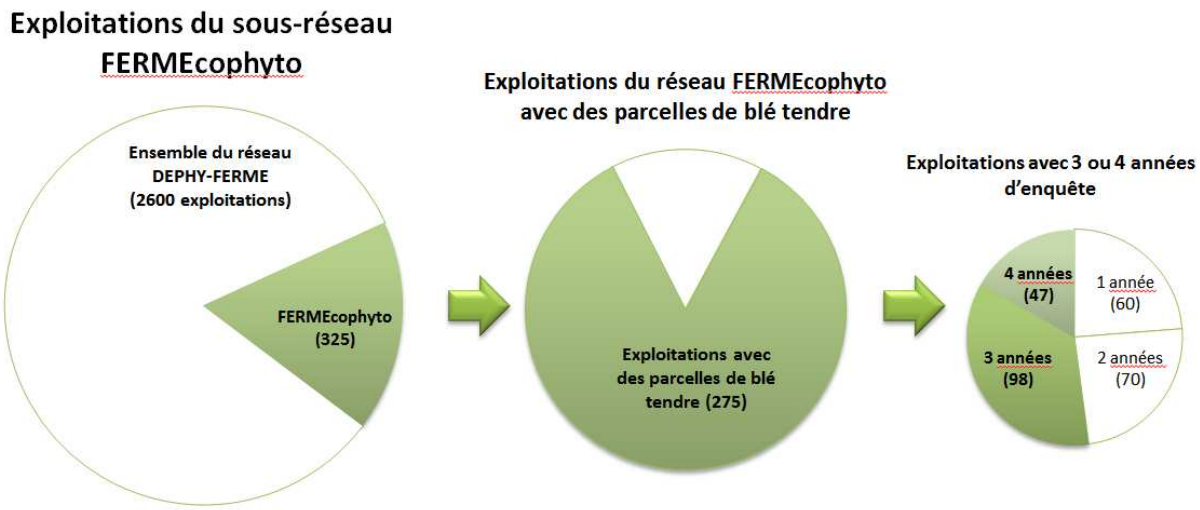


Figure 10 : Répartition des 145 exploitations issues du réseau FERMEcophyto et mobilisées pour la thèse

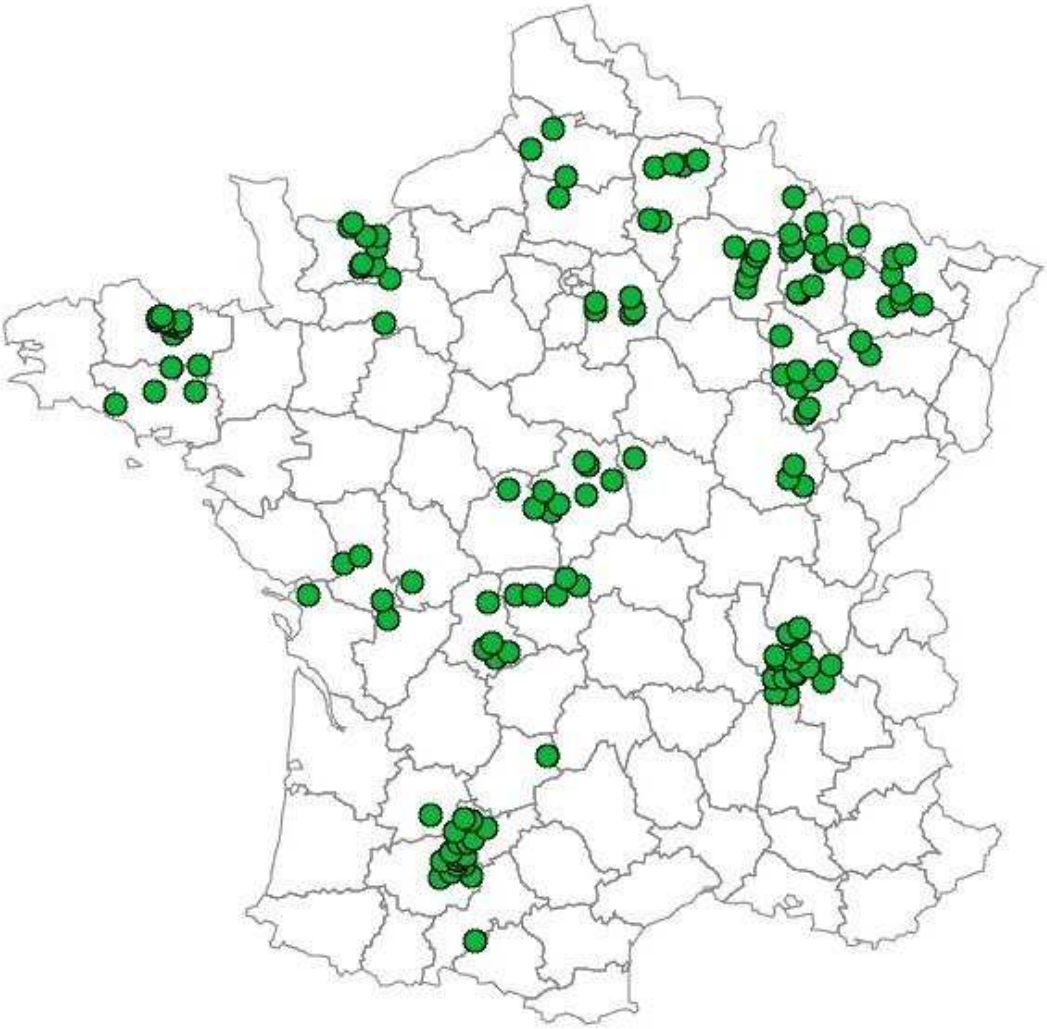


Figure 11 : Localisation des 145 exploitations sélectionnées au sein du sous-réseau FERMEcophyto

SECTION 2 : ANALYSE DE LA ROBUSTESSE DU RENDEMENT DU BLE TENDRE FACE AUX PERTURBATIONS ABIOTIQUES

Chapitre 3 : Caractérisation et quantification des perturbations abiotiques sur le rendement du blé tendre

Ce chapitre se présente sous la forme d'un article soumis à la revue internationale European Journal of Agronomy en juin 2016. La version ci-après comprend l'ensemble des figures et des tableaux dont une partie avait été placée en annexes dans la version soumise. Cet article présente l'indicateur de perturbations abiotiques utilisé pour analyser la robustesse du rendement du blé tendre sur les 145 exploitations agricoles du réseau FERMEcophyto face à ces perturbations.

Dans un premier temps, les facteurs abiotiques limitants du blé ont été étudiés à travers le calcul de 15 indicateurs phénoclimatiques pertinents du point de vue de l'élaboration du rendement. Ces indicateurs ont ensuite été utilisés pour effectuer une classification des principaux environnements de la culture de blé tendre à l'échelle de ce réseau de 145 exploitations agricoles. Le modèle STICS enfin a été utilisé afin de simuler la variabilité du rendement du blé sur la période 1983-2014. A l'échelle de chaque exploitation et en tenant compte des caractéristiques pédologiques de chaque parcelle, nous avons ainsi construit un indicateur de perturbations abiotiques qui agrège l'impact des facteurs limitants abiotiques sur le rendement du blé.

Dans un second temps, la variabilité temporelle et spatiale de cet indicateur a été analysée pour l'ensemble des exploitations du réseau FERMEcophyto. Les résultats montrent une très grande hétérogénéité spatiale, soulignant le fait que les exploitations agricoles françaises ne sont pas soumises aux mêmes types de perturbations abiotiques. Par ailleurs, l'analyse temporelle de cet indicateur depuis 1983 montre que l'intensité de ces perturbations abiotiques a augmenté pour certaines exploitations et, plus intéressant encore, que leur variabilité interannuelle a également augmenté dans plusieurs zones géographiques. Ces résultats confirment le contexte d'incertitude croissant auquel sont confrontées les exploitations agricoles françaises, de même que l'urgence d'identifier des leviers pour augmenter leur robustesse face à ces perturbations.

Characterization and quantification of abiotic perturbations on wheat yield

Nicolas Urruty[a,b,], Hervé Guyomard[a], Delphine Tailliez-Lefebvre[c], Christian Huyghe[a]*

(a) INRA, CODIR Agriculture, 147 rue de l'Université, F-75338 Paris, France
(b) University of Poitiers, PRES France Centre Atlantique Université, 15 rue de l'Hôtel Dieu, 86073 Poitiers, France
(c) AgroSolutions, 81 avenue de la Grande Armée, Paris, France

Abstract

Characterization and quantification of wheat exposure to abiotic perturbations is of high importance to assess the robustness of agricultural systems to future climatic conditions as well as the identification of adequate measures to adapt to unpredictable changes. In this paper, we propose an original approach to characterize and quantify abiotic perturbations on wheat yield and we apply this framework to a large network of 145 French wheat-growing farms. First, abiotic perturbations were characterized at farm level through the use of 15 indicators related to different weather limiting factors and different growth stages. Next, these indicators were used to define a limited number of wheat-producing environments. Finally, the STICS crop model was used to simulate wheat yields under variable weather conditions over the period 1983-2014 and develop an index measuring the aggregated impact of abiotic perturbations on wheat yield. Our results highlight remarkable spatial differences in both the nature and intensity of abiotic perturbations. Results of temporal variability show that the intensity of abiotic perturbations and their inter-annual variability have increased in several specific climatic zones, demonstrating the growing context of unpredictability for wheat producers. Our study contributes to a better understanding of the impact of climate variability on wheat yields and allows the use of this index for the assessment of yield robustness.

Key words: Bread wheat yield; abiotic perturbations; weather varibility, crop modeling; stress index.

I. Introduction

Wheat is one of the major food crops in the world. Worldwide production reached 730 million tons in 2015 (FAO, 2016). However, due to unpredictable perturbations such as weather variability or pest outbreaks, its yield can vary considerably at both farm and regional level and from one year to another (Olesen *et al.*, 2000). By the end of this century, climate change is expected to increase weather variability, pest dynamics and extreme events such as droughts and storms (IPCC, 2014). Consequently, developing a better understanding of the relationships between weather variability and crop production is crucial to effectively address

how climate change may affect food security and propose region-specific adaptation and mitigation strategies (National Research Council, 2010).

Recently, various concepts have been developed to discuss the sustainability of agricultural systems in a context of global changes (Urruty *et al.*, 2016). Among them, the concept of robustness can be defined as the ability of agricultural systems to maintain its performances under changing weather or economic conditions. Despite some applications in animal science (ten Napel *et al.*, 2011; Ollion, 2015), the empirical assessment of robustness remains a challenge, notably in arable cropping systems. For its implementation, it is necessary to define precisely the boundaries of the system under consideration (robustness *of what?*), the type of perturbations (robustness *to what?*) and the performance studied (robustness *for what?*). In the specific case of wheat production, an urgent need is thus to develop indexes to assess local-level exposure to a perturbation and measure the capacity of agricultural systems to resist and adapt to that perturbation.

Many studies have focused on the influence of meteorological drivers and weather variability on wheat yield (Bray *et al.*, 2000; Porter and Semenov, 2005; Lobell and Burke, 2010; Ceglar *et al.*, 2016). In recent years, the number of studies published on the subject has grown, at the same time as climate change concerns have become increasingly important. However, the quantification of local-levels of exposure to abiotic perturbations has been usually restricted to specific factors such as drought (Luers *et al.*, 2003; Simelton *et al.*, 2009) or heat waves (Barnabas *et al.*, 2008), and/or at particular growth stages, such as during grain filling (Liu *et al.*, 2014). Few studies have attempted to construct aggregated indexes of local-level exposure taking into account the combination of abiotic perturbations over the different growth stages of wheat (Holzkämper *et al.*, 2013, Caubel *et al.*, 2015; Thiry *et al.*, 2016). These approaches are usually based on expert-assessment and, consequently, involve subjective judgment for the aggregation of the indicators. In particular, aggregation weights and normalization functions can vary considerably according to the expert assessment and her (his) specific area of knowledge (Caubel *et al.*, 2015). Other approaches are based on mechanistic (dynamic) crop modeling (van der Velde *et al.*, 2012) but very few have been applied to large-scale implementations and real-farm conditions.

The aim of this paper is thus to develop an index of abiotic perturbations at farm level which summarizes the negative impacts of weather variability on wheat growth and yield. We provide an original approach based on both agro-climatic indicators and the use of a crop model, and we apply this framework to a large network of 145 French wheat-growing farms. This approach was divided into four steps (Figure 12): 1) the main abiotic limiting factors of wheat were characterized at farm level through the use of 15 agro-climatic indicators related to different limiting factors and different growth stages; 2) a classification of the main wheat-producing environments was established on the basis of the average intensity of abiotic limiting factors; 3) the impacts of weather variability on wheat yield were assessed through crop modelling; and finally 4) an index of abiotic perturbations was calculated.

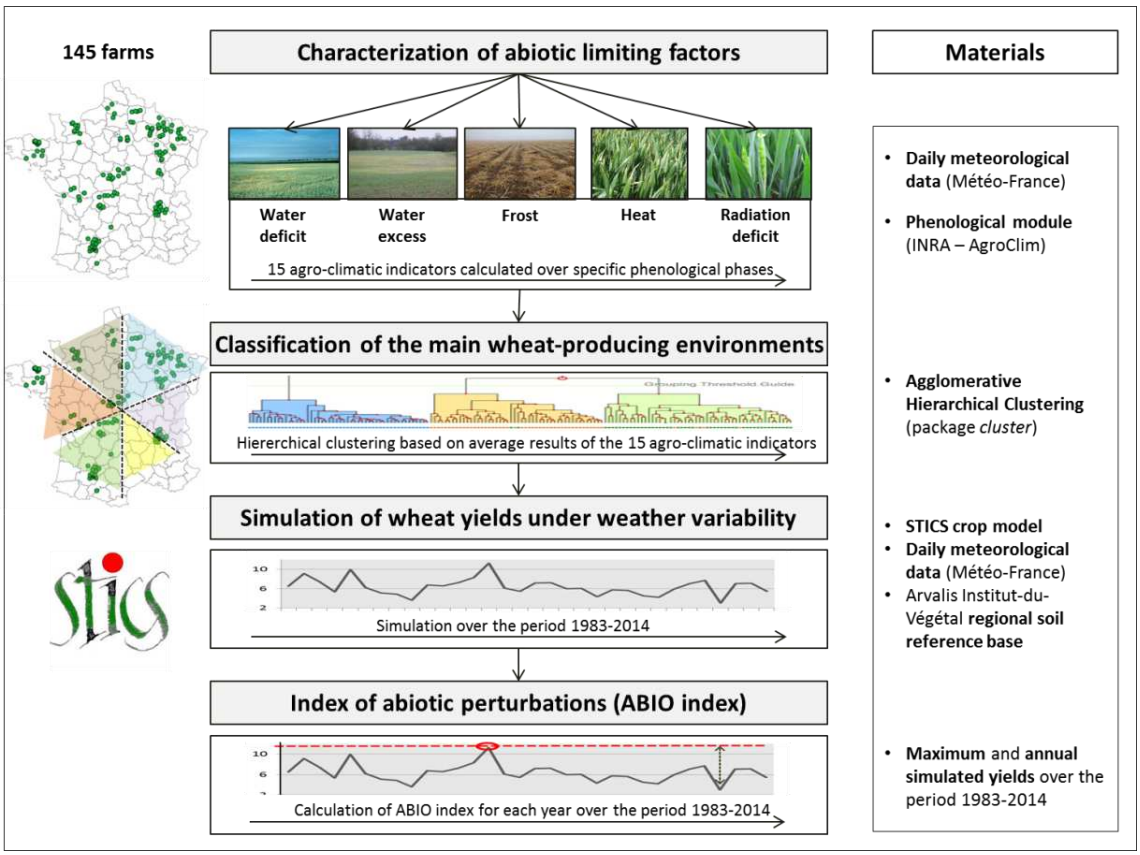


Figure 12 : The four steps of the method and materials used to develop the index of abiotic perturbations

II. Materials and methods

II.1. Data

Our approach was performed using data from a sample of 145 farms involved in the French governmental program Ecophyto, intended to significantly reduce agricultural and non-agricultural pesticide use (Ecophyto Plan, 2008). The dataset include wheat yields, soil characteristics and numerous agronomic practices of a total of 2,327 wheat parcels over the period 2011 to 2014. The dataset was provided by the major French agricultural cooperative group InVivo and its member cooperatives.

Daily meteorological data over the period 1983-2014 were provided by Météo-France for each farm location. They originate from the SAFRAN/France database which combines weather observations and model simulations at the scale of 8x8 km spatial meshes. This database has been validated over a wide range of environmental conditions in France (Quintana-Seguí *et al.*, 2008).

II.2. Characterization of abiotic limiting factors of wheat (step 1)

For each farm, the main abiotic limiting factors of wheat crop were studied through the use of 15 agro-climatic indicators calculated on an annual basis for relevant phenological phases (Table 3). These indicators were selected according to previous studies and expert opinions about the main abiotic limiting factors affecting wheat yield in France (Lecomte, 2005; Gate *et al.*, 2008; Prost, 2008; Caubel *et al.*, 2015). They cover five categories of perturbations (water deficit, water excess, frost, heat and radiation deficit) and six phenological periods: i) sowing (Zadoks 00) to emergence (Zadoks 10), ii) emergence to ear at 1cm (Zadoks 30), iii) ear at 1cm to meiosis (Zadoks 39), iv) around meiosis (more or less five days), v) meiosis to flowering (Zadoks 60) and vi) flowering to ripening (Zadoks 89). Phenological periods are defined by Zadoks decimal code for the growth stages of cereals (Zadoks *et al.*, 1974).

This approach has been used in previous studies (Mkhabela et al., 2010; Holzkämper et al., 2013; Gouache et al., 2015). Its main advantage is that it provides more accurate information than indicators calculated over invariant periods (e.g., 1st January-31st July), in particular considering the effects of climate on particular plant processes occurring during specific crop development phases (Caubel *et al.*, 2015).

The 15 indicators were calculated annually for each farm over the period 1983-2014. The scheduling of the different phenological phases was based on a phenological module driven by the concept of thermal time (growing degree day) and developed as part of the STICS crop model (Brisson *et al.*, 2002). For each farm, the initiation of the phenological module was based on the average sowing date observed between 2011 and 2014. The scheduling of the other phenological phases (emergence, ear at 1cm, meiosis, flowering and ripening) was calculated annually according to the number of growing degree days required for moving from one phenological phase to another (Figure 13) but also according to photoperiod conditions and vernalisation requirements (for more details about this module, see Brisson *et al.* (2008)).

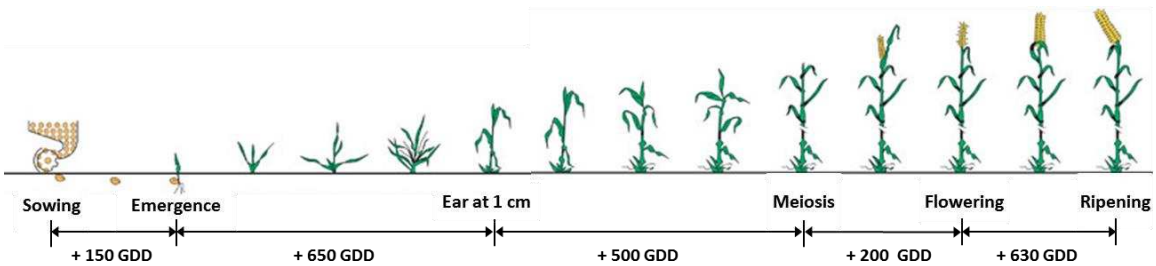


Figure 13 : Number of growing degree days (GDD) used to predict wheat phenological phases (based on Gate, 1995)

Table 3 : Agro-climatic indicators used to characterize the main abiotic limiting factors across the 145 farms

Phenological periods	Categories	Indicators	Definition	Unit	References
Sowing - emergence	Water deficit	Sum of water deficit	Sum of the daily water deficit (rain - evapotranspiration)	mm	Priestley and Taylor (1972)
	Water excess (capping)	Severe heavy rain days	Number of days with total rainfall above 30 mm	Days	Easson *et al.* (1993)
Emergence - ear at 1cm	Water deficit	Water stress day frequency	Sum of the daily water deficit (rain - evapotranspiration)	%	Priestley and Taylor (1972)
	Frost	Cold days_Tmin	Number of days with minimum temperature below -8°C	Days	Zheng *et al.* (2012)
Ear at 1cm - meiosis	Water deficit	Water stress day frequency	Sum of the daily water deficit (rain - evapotranspiration)	%	Priestley and Taylor (1972)
	Frost	Cold days_Tmin	Number of days with minimum temperature below -4°C	Days	Fuller *et al.* (2007)
Around meiosis (-5 days and +15 days)	Frost	Cold days_Tmin	Number of days with minimum temperature below 4°C	Days	Thakur *et al.* (2010)
	Radiation deficit	Average daily solar radiation	Average daily solar radiation	MJ/m² /day	Demotes-Mainard *et al.* (1995)
Meiosis - flowering	Water deficit	Sum of water deficit	Sum of the daily water deficit (rain - evapotranspiration)	mm	Priestley and Taylor (1972)
	Frost	Cold days_Tmin	Number of days with minimum temperature below 4°C	Days	Thakur *et al.* (2010)
	Radiation deficit	Average daily solar radiation	Average daily solar radiation	MJ/m² /day	Nalley *et al.* (2009)
	Heat stress	Heat days	Number of days with maximum temperature above 30°C	Days	Saini and Aspinall (1982)
Flowering - ripening	Water deficit	Water stress day frequency	Sum of the daily water deficit (rain - evapotranspiration)	%	Priestley and Taylor (1972)
	Heat stress	Heat days	Number of days with maximum temperature above 25°C	Days	Acevedo *et al.* (2002)
	Water excess (lodging)	Heavy rain days	Number of days with total rainfall above 20 mm	Days	Easson *et al.* (1993)

II.3. Classification of the main wheat-producing environments (step 2)

Following an analysis of correlations among the 15 agro-climatic indicators in order to eliminate non-independent variables, an Agglomerative Hierarchical Clustering (AHC) approach was performed using the average values of the finally selected agro-climatic indicators calculated over the period 1983-2014. The purpose of this step was to identify the main wheat-producing environments across the 145 farms. The *Agnes* function (« agglomerative nesting ») from *cluster* package in R (Maechler *et al.*, 2015) was used.

The AHC is a bottom-up approach in which each observation, i.e., each farm, starts in its own cluster, and pairs of clusters are progressively merged as one moves up the hierarchy. At each step of the iteration process, the closest (most similar) pairs of observations are aggregated using the Ward's minimum variance criterion which minimizes the increase in the total intra-class inertia. The optimal number of clusters was defined on the basis of the Hubert-Levin C index (Hubert and Levin, 1976), which measures, at each iteration, the difference between the maximal intra-cluster distance and the minimal inter-cluster distance (Gurrutxaga *et al.*, 2011; Islam *et al.*, 2015).

II.4. Simulation of wheat yields over the period 1983-2014 (step 3)

For each farm, the temporal variability of wheat yield was simulated through the STICS crop model (Brisson *et al.*, 2002) over the period 1983-2014. The aim was not to simulate real yields, but to estimate inter-annual yield changes due to weather variability. The previous classification of wheat-producing environments was used to parametrize the STICS model with constant wheat management practices in each environment over the whole period 1983-2014. Consequently, inter-annual yield changes simulated at the farm level are solely due to inter-annual variations in weather conditions.

Parametrization of the STICS crop model was achieved in several steps (Table 4). First, crop management practices were parametrized homogeneously in each wheat-producing environment according to average wheat management practices observed across the farms of each environment. Secondly, daily meteorological data were used to parametrize weather conditions at farm level. Lastly, soil characteristics derived from both initial database and Arvalis Institut-du-Végétal regional soil reference base were used to parametrize soil parameters at parcel level.

The STICS crop model has been used in numerous studies dealing with the impacts of weather variability on crop yield in France (Ruget *et al.*, 2009; Brisson *et al.*, 2010; Constantin *et al.*, 2012). The model is based on a mathematical algorithm in which the weather, operating on a daily time step, acts as a driving force (temperature, radiation) and as a stress generator (water and nitrogen stresses, extreme temperatures, waterlogging). However, this model does not take into account biotic parameters, such as diseases, pests and weeds.

Table 4 : Parametrization of the STICS crop model for the 145 farms

Spatial level	Parametrization module	Parametrization variables
Wheat-producing environment	Wheat management practices	Average sowing date and sowing density
		Average nitrogen dose and schedule
		Average variety earliness (heading stage)
Farm	Daily meteorological data over the period 1983-2014	Temperature (minimum and maximum)
		Rainfall
		Wind
		Global radiation
		Relative humidity
		Potential Evapotranspiration (Penman-Monteith method)
Parcel	Soil parameters of each soil layer	Clay content
		Nitrogen content
		Thickness
		Water content at field capacity and at wilting point
		Bulk density of fine earth fraction
		Nature and volumetric content of pebbles

II.5. Index of abiotic perturbations (step 4)

An index of abiotic perturbations (ABIO index) was finally calculated for each parcel according to temporal variability of simulated yields. For every year 1983 to 2014, this index was calculated as the relative yield difference between the annual simulated yield and the maximum simulated yield, i.e., as follows:

$$ABIO_{ikt} = \frac{(Y_{ik} - y_{ikt})}{Y_{ik}} \qquad (1)$$

where $ABIO_{ikt}$ is the index of abiotic perturbations of plot i in farm k at time t, Y_{ik} is the maximum simulated yield of plot i in farm k over the period 1983-2014, and y_{ikt} is the annual simulated yield of plot i in farm k at time t.

Temporal variability of the ABIO index across the different farms and wheat-producing environments was analyzed through linear regression to test whether the ABIO index is significantly increasing or decreasing over time. To test whether year-to-year variability has increased in the different wheat-producing environments, rolling variance (Varela, 2007) was calculated using different rolling window sizes (from two to six years). The Student's t-statistics was used to test the statistical significance of the regression coefficient associated with time.

III. Results

III.1. Abiotic limiting factors

The 15 agro-climatic indicators were calculated over the period 1983-2014 for the 145 farms. Results show considerable spatial differences across France, they also vary according to phenological phases. Average water deficit is higher in south-western France for the early phenological stages (emergence to ear at 1cm) and declines thereafter (Figure 14). In the final phases, water deficit is higher in north-eastern France. Water excess indicators are higher in mountainous or hilly regions such as east-central France (Figure 15). Early and winter frost indicators are higher in north-eastern France and spring frost indicators are higher in south-western France (Figure 16). Heat stress indicators are higher in southern France (Figure 17) and radiation deficit indicators are higher in western France (Figure 18).

The analysis of correlation coefficients among the 15 agro-climatic showed many inter-relationships between the different abiotic limiting factors (Appendix 3.1). Strong positive correlations (Pearson's correlation coefficient above 0.40) were found between water deficit indicators and heat stress indicators calculated over the late phenological phases, between frost indicators calculated around meiosis and between meiosis and flowering, and between the two radiation deficit indicators. Strong negative correlations (Pearson's correlation coefficient below -0.40) were found between water deficit and water excess indicators calculated over early and late phenological phases, as well as between water deficit and radiation deficit indicators calculated between meiosis and flowering.

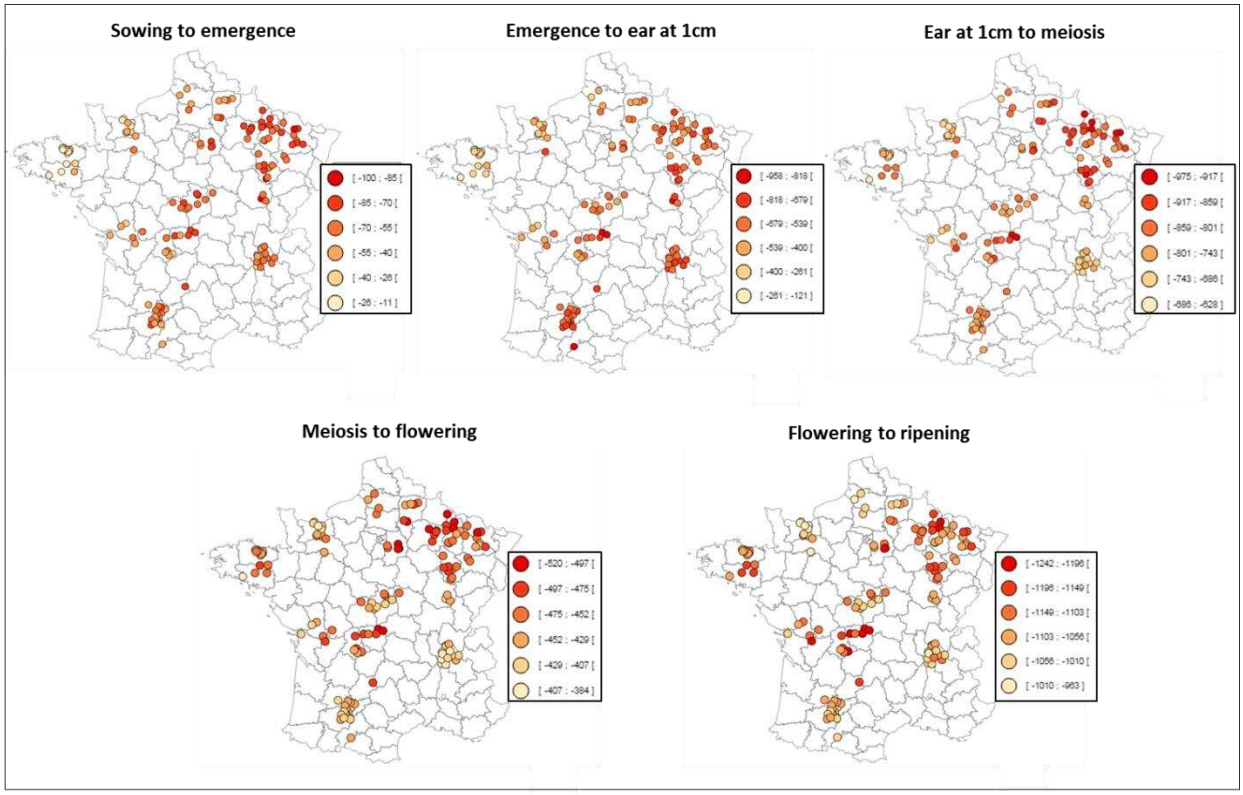


Figure 14 : Average water deficit indicators calculated over the period 1983-2014 and five phenological phases. For example, the first map shows the average sum of daily water deficit (in mm) between sowing and emergence of wheat

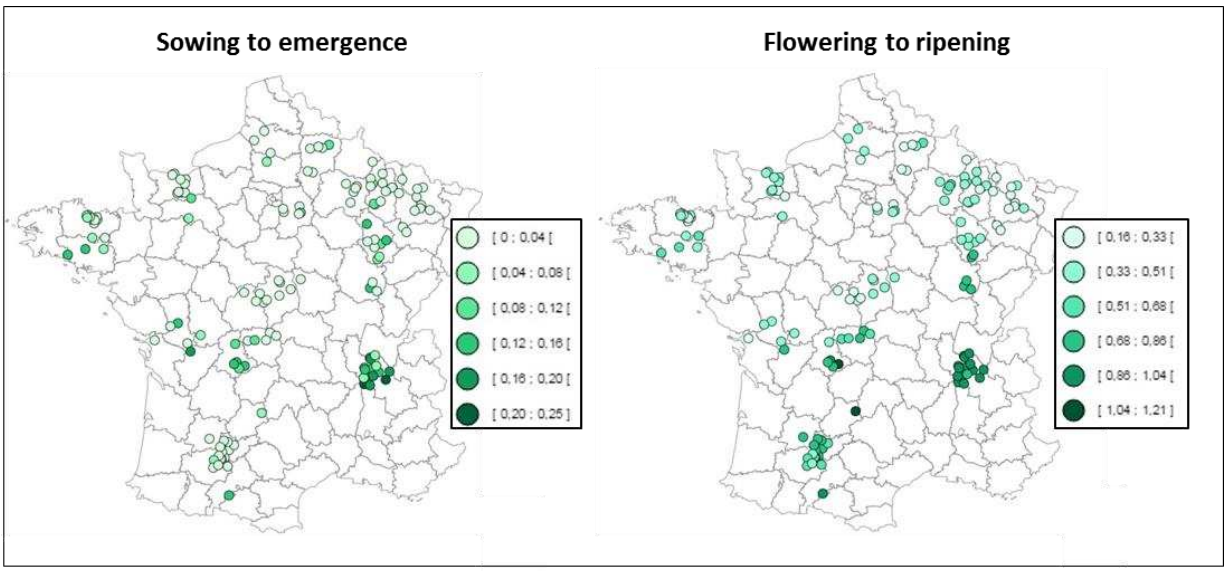


Figure 15 : Average water excess indicators calculated over the period 1983-2014 and two phenological phases. For example, the first map shows the average number of days with total rainfall above 30 mm between sowing and emergence of wheat

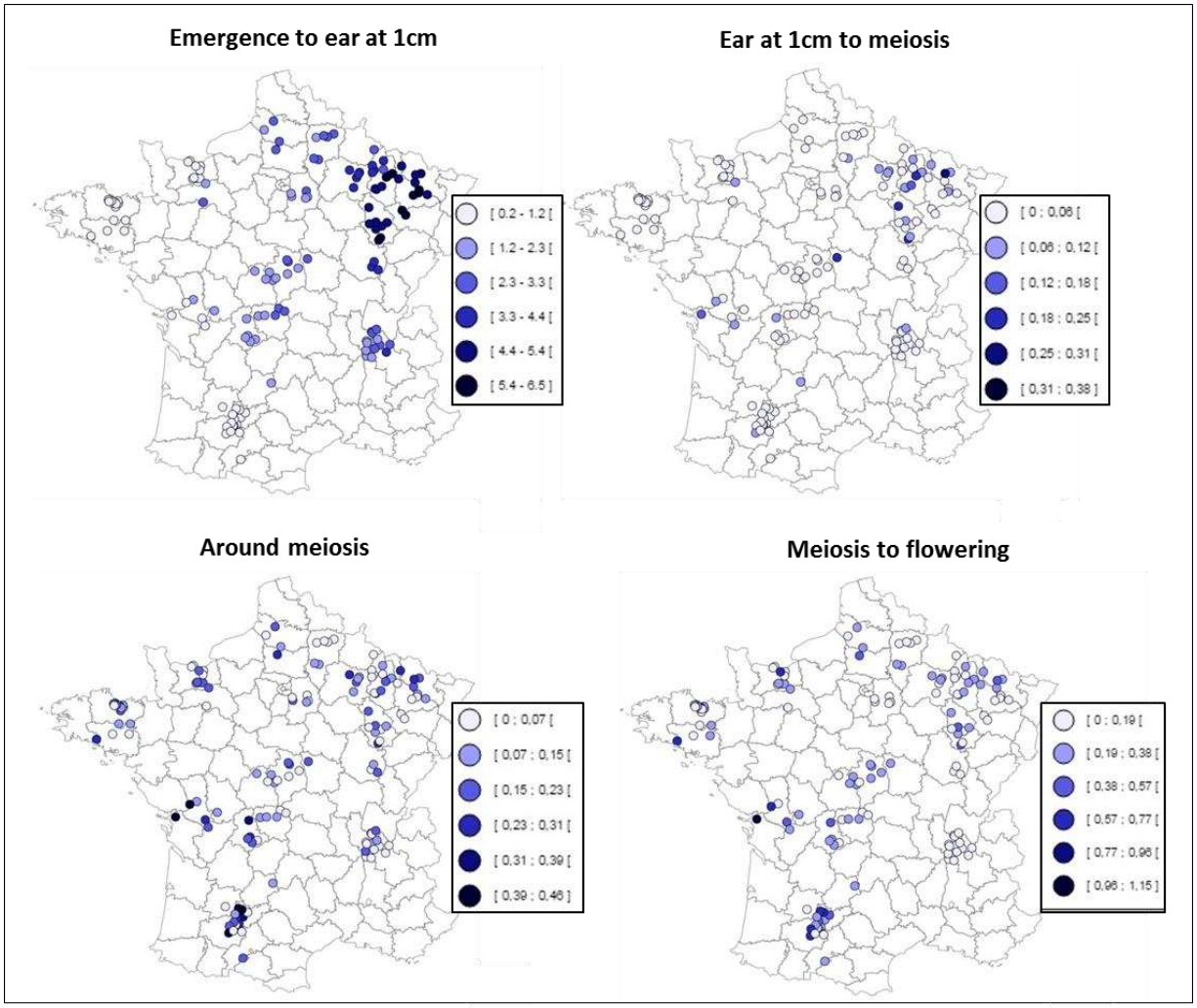


Figure 16 : Average frost indicators calculated over the period 1983-2014 and four phenological phases. For example, the first map shows the average number of days with minimum temperature below -8°C between emergence and ear at 1cm of wheat

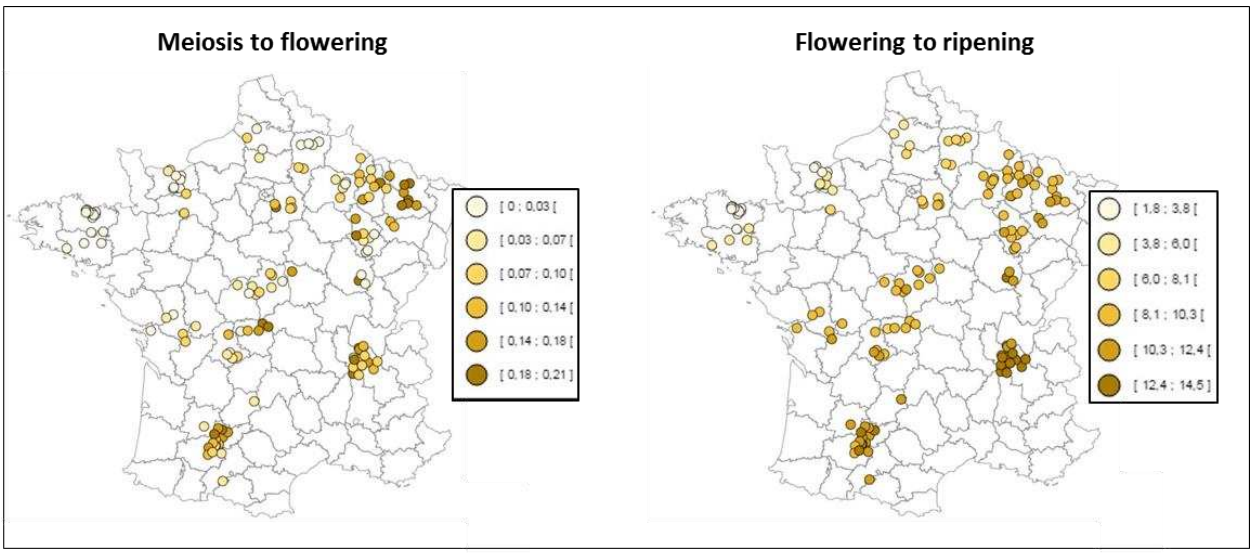


Figure 17 : Average heat indicators calculated over the period 1983-2014 and two phenological phases. For example, the first map shows the average number of days with aximum temperature above 30°C between meiosis and flowering of wheat

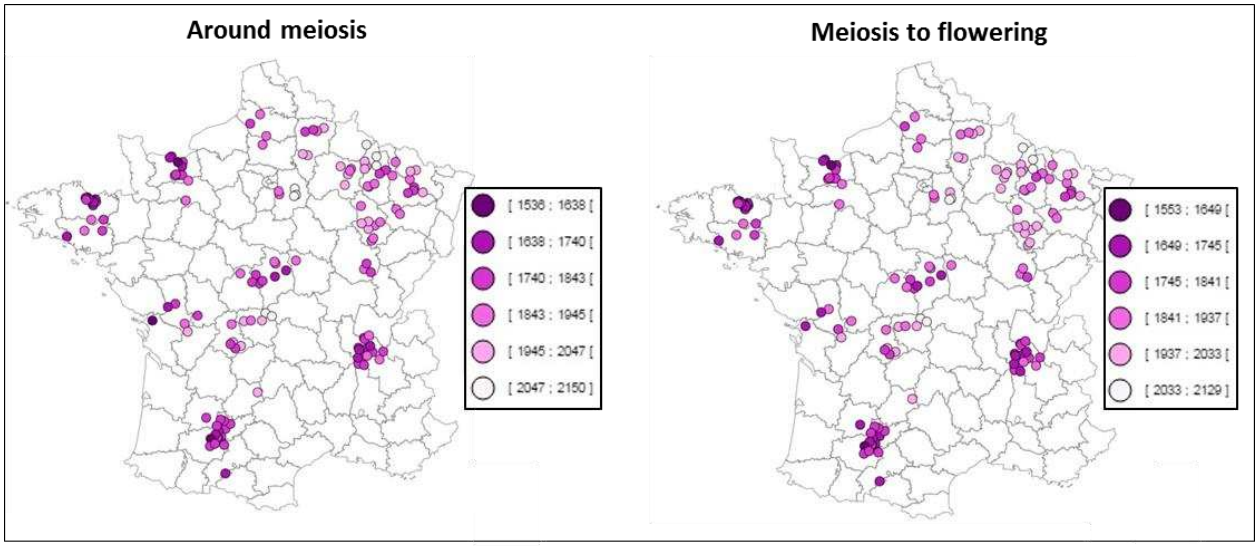


Figure 18 : Average radiation deficit indicators calculated over the period 1983-2014 and two phenological phases. For example, the first map shows the average daily solar radiation around meiosis (five days prior and after it)

III.2. Six wheat-producing environments

Following the analysis of correlations among the 15 agro-climatic indicators, three variables were eliminated as they were closely linked to other indicators: i) number of frost days around meiosis, ii) radiation deficit around meiosis, and iii) water deficit between meiosis and flowering. Average results calculated over the period 1983-2014 of the 12 remaining agro-climatic indicators were used to perform the hierarchical clustering approach (see Appendix 3.2 for full details). Six clusters corresponding to six contrasting wheat-producing environments (zones A to F) were discriminated (Figure 19).

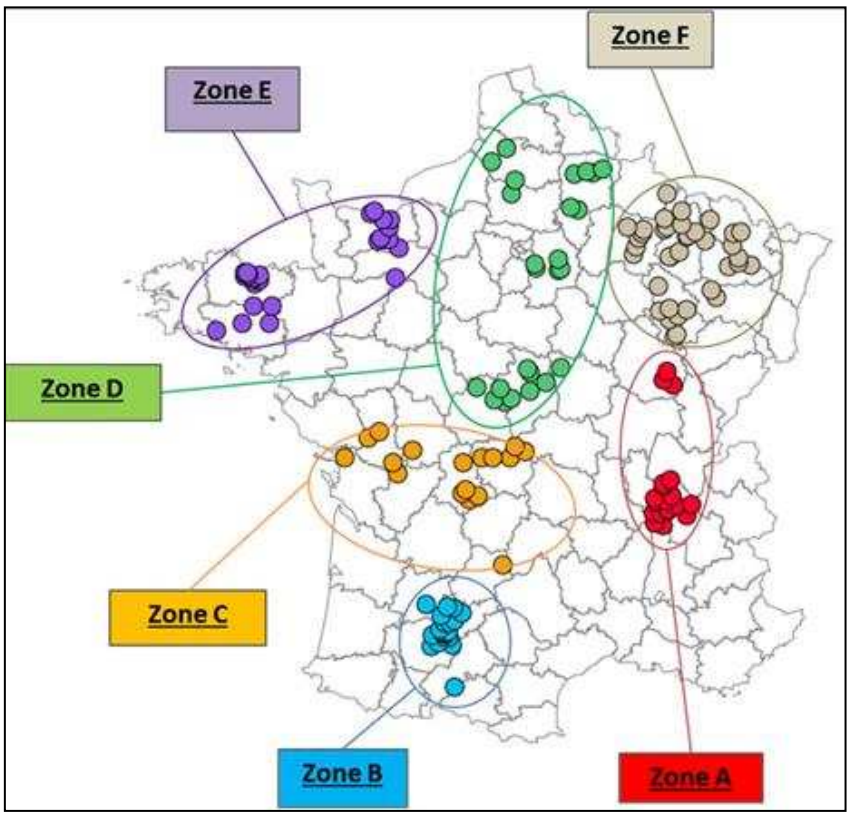


Figure 19 : Six wheat-producing environments across the 145 farms of the FERMEcophyto network

The average intensities of the 15 agro-climatic indicators in each wheat-producing environment are presented in Table 5. The first environment (zone A) includes 19 farms located in east-central France which have been mainly exposed to cold temperatures during winter, heat days after flowering and water excess at the beginning and at the end of wheat cycle. The second environment (zone B) includes 21 farms located in south-western France which have been mainly exposed to heat stress after flowering and frost damages during spring. In the third environment (zone C), the 17 farms have been mainly exposed to water deficit after joint stage and frost damages during spring. The fourth environment (zone D) includes 25 farms located in central and north-central France which have been exposed to frost damages during winter and, to a lesser extent, to heat days after flowering. The fifth environment (zone E) includes 27 farms located in north-western France which have been exposed to lower intensities of abiotic limiting factors, except radiation deficit around meiosis. The last environment (zone F) includes 36 farms located in north-eastern France which have been mainly exposed to frost damages during winter, water deficit and heat stress at the end of wheat cycle.

Table 5 : Average intensities of the 15 agro-climatic indicators calculated in each wheat-producing environment

	Water deficit (mm)					Frost (days)				Heat stress (days)		Radiation (MJ/m²/day)		Water excess (days)	
	Sowing - emergence	Emergence - ear at 1cm	Ear at 1cm - meiosis	Meiosis - flowering	Flowering - ripening	Emergence - ear at 1cm	Ear at 1cm - meiosis	Meiosis - flowering	Around meiosis	Meiosis - flowering	Flowering - ripening	Meiosis - flowering	Around meiosis	Sowing - emergence	Flowering - ripening
Zone A (n=19)	-58	-698	-732	-414	-1053	2.6	0	0.1	0.1	0.1	13	1778	1793	0.1	0.9
Zone B (n=21)	-57	-683	-784	-431	-1055	0.9	0	0.3	0.2	0.1	12	1751	1758	0	0.6
Zone C (n=17)	-58	-603	-842	-467	-1161	1.8	0	0.3	0.2	0.1	9	1914	1905	0.1	0.7
Zone D (n=25)	-63	-563	-829	-461	-1082	2.3	0	0.2	0.1	0.1	8	1888	1891	0	0.3
Zone E (n=27)	-35	-361	-746	-437	-1064	0.5	0	0.2	0.1	0	3	1744	1738	0	0.4
Zone F (n=36)	-73	-633	-872	-475	-1123	4.8	0.1	0.2	0.1	0.1	10	1947	1935	0	0.4

Note 1: n is the number of farms in each climatic zone.

Note 2: the color code allows differentiating the zones characterized by high *versus* low intensity of abiotic perturbations on average over the period 1983-2014.

These six wheat-producing environments are also characterized by very different soil types. This is illustrated by the variability of soil water reserves among the six geographical zones (Figure 20). In particular, wheat crops are mainly produced on shallow soils in zones B, C and F, whereas wheat crops in zones A, D and E are produced on deeper and more diverse soils. Because the final impacts of abiotic perturbations on wheat yield depend on soil characteristics, in particular on soil water reserve, it is needed to link information on weather variability and soil characteristics. To that end, we have used the STICS crop model to estimate the aggregated impacts of abiotic limiting factors on wheat yield while simultaneously taking into account parcel soil characteristics.

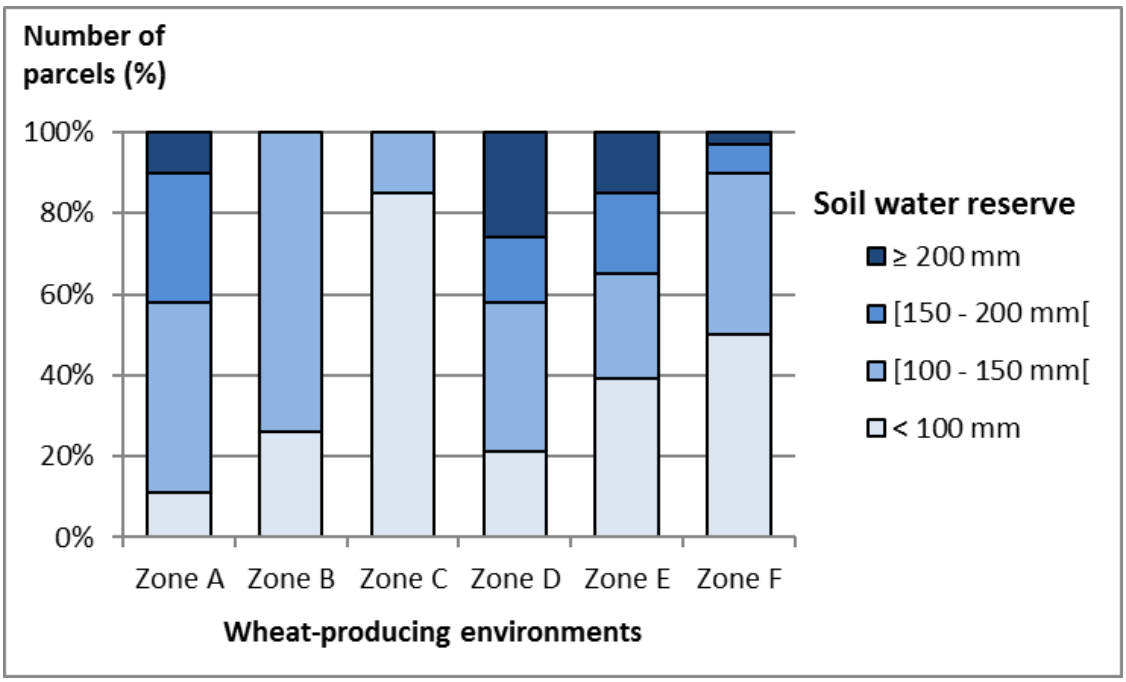


Figure 20 : Cumulative percentage of soil types based on water reserve groups among the 2,327 parcels distributed in the six wheat-producing environments

III.3. Yield simulations through the STICS crop model

The STICS crop model was parametrized with the same management practices over the different farms of each wheat-producing environment. Management practices were kept constant over the period 1983-2014 but defined on the basis of average practices observed between 2011 and 2014 across the farms located in the corresponding zone (Table 6). Yield simulations were performed over the period 1983-2014 for each farm and each type of soil (Figure 21).

Table 6 : Average wheat management practices used to parametrize STICS crop model in the six wheat-producing environments

Wheat-producing environments	Sowing date	Sowing density (kg/ha)	Wheat variety (earliness at heading stage)	Total nitrogen rate (kg/ha)	Number of nitrogen applications	Dates of nitrogen applications
Zone A	19-oct	150	Arezzo (early)	160	3	21/02-19/03- 17/04
Zone B	06-nov	150	Bologna (very early)	200	4	09/02-14/03-06/04-26/04
Zone C	24-oct	190	Arezzo (medium early)	140	3	24/02-25/03- 19/04
Zone D	16-oct	165	Bermude (medium early)	170	3	22/02-22/03- 24/04
Zone E	30-oct	150	Altigo (early to medium early)	150	3	25/02-26/03- 18/04
Zone F	07-oct	165	Brentano (medium late)	160	3	03/03-25/03- 20/04

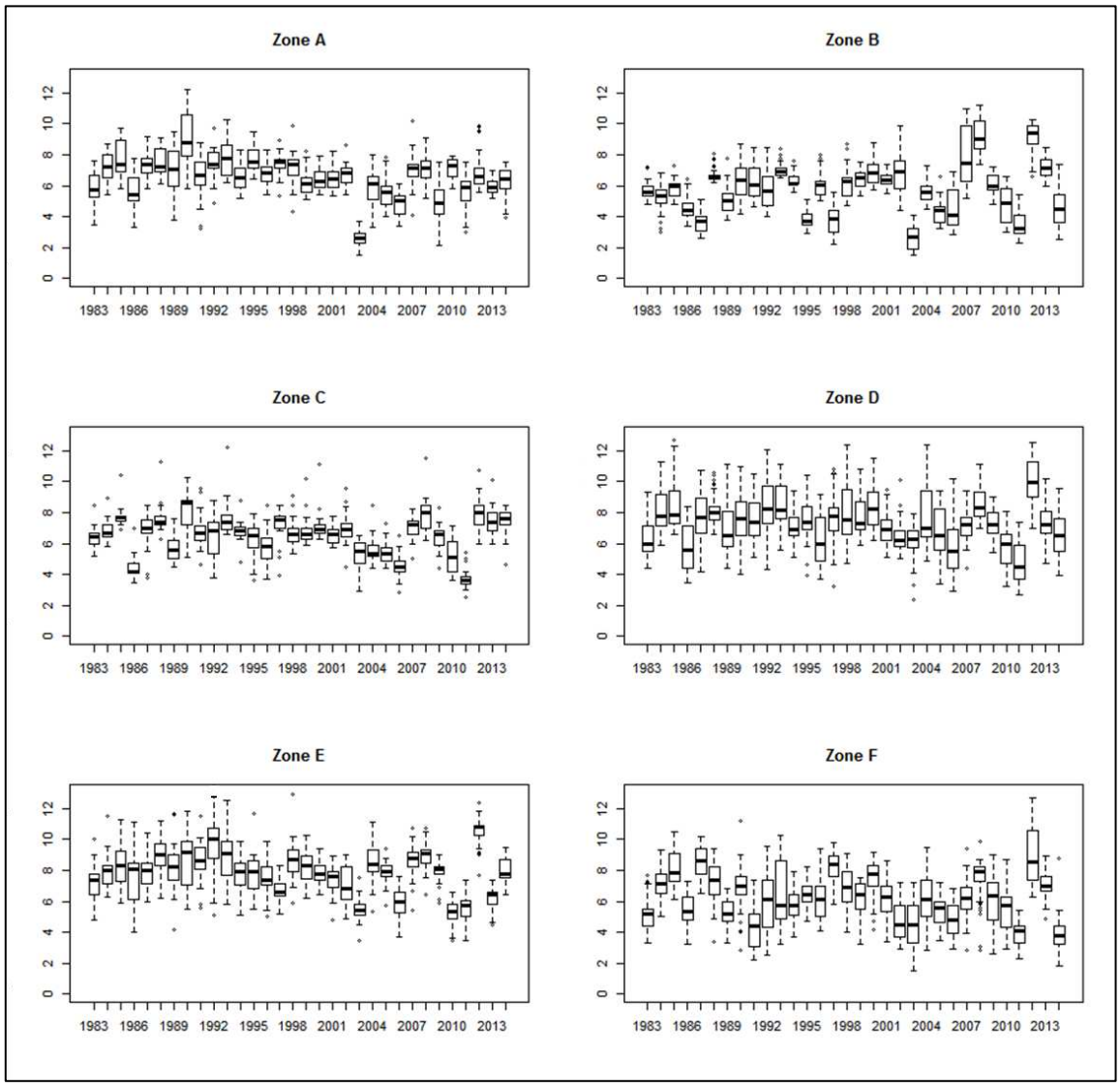


Figure 21 : Temporal variability of simulated yield (in t/ha) over the period 1983-2014 in the six wheat-producing environments

To assess the global quality of yield simulations, observed yields over the period 2011-2014 were compared to simulated yields over the same period. However, as we did not use accurate wheat management practices for the STICS model parametrization, it was not possible to compare observed and simulated yields at farm level and even less at parcel level. As a result, we only compared observed and simulated yields at the level of each wheat-producing environment (Table 7), and compared their means using Student's t-tests. Over the period 2011-2014, no significant differences were statistically identified between observed and simulated yields, a result that shows that STICS simulations were consistent with observed data. In 2011 and 2012, each year taken separately, observed and simulated yields were however significantly different: simulated yields were lower in 2011 and higher in 2012 due to STICS. In 2013 and 2014, no significant differences were identified.

Table 7 : Average observed and simulated wheat yields (in t/ha) over the period 2011-2014 in the six wheat-producing environments

Wheat-producing environments	2011		2012		2013		2014		2011-2014	
	Obs-erved	Simu-lated	Obs-erved	Simu-lated	Obs-erved	Simu-lated	Obs-erved	Simu-lated	Obs-erved	Simu-lated
Zone A	7.0	5.5	7.1	6.9	6.6	6.0	6.9	6.2	6.9	6.2
Zone B	4.3	3.5	6.5	9.1	5.7	7.2	5.5	4.4	5.6	6.1
Zone C	5.7	3.7	6.5	7.9	6.5	7.4	6.3	7.4	6.3	6.6
Zone D	7.4	4.8	7.8	10.1	8.4	7.4	7.9	6.6	7.9	7.2
Zone E	8.1	5.5	8.3	10.4	8.1	6.2	8.2	8.0	8.2	7.5
Zone F	7.4	3.9	6.4	8.9	7.4	7.0	6.8	3.8	6.8	5.9
Total	**6.6**	**4.5**	**7.1**	**8.9**	**7.1**	**6.9**	**6.9**	**6.1**	**6.9**	**6.6**

III.4. Quantification of the ABIO index

The index of abiotic perturbations (ABIO index) was calculated annually for each farm according to simulated yields over the period 1983-2014. The average intensity of this index over the 30-year period varies greatly from one region to another and from one farm to another (Figure 22). It was significantly higher in south-western (zone B) and north-eastern (zone F) wheat-producing environments compared to the national average (Table 8). Conversely, the intensity of ABIO index was significantly lower in east-central (zone A), west-central (zone C) and north-western (zone E) environments. Spatial variability of ABIO index was also very large within each wheat-producing environment. This is notably the case in wide geographical zones such as D and F due to contrasting soil and weather characteristics from one farm to another.

Table 8 : Average ABIO indexes calculated over the period 1983-2014 in the six wheat-producing environments

Wheat-producing environments	Average ABIO index
Zone A	**0.24** (± 0.06) ***
Zone B	**0.43** (± 0.03) ***
Zone C	**0.25** (± 0.03) ***
Zone D	**0.29** (± 0.06) *NS*
Zone E	**0.26** (± 0.04) ***
Zone F	**0.35** (± 0.08) ***

Note 1: empirical standard deviations of ABIO indexes are in brackets.
Note 2: Student's t-test of the equality of the average ABIO index in one zone A to F compared to the average ABIO index calculated over the full set of farms (all zones) and over the period 1983-2014 (the latter is equal to 0.31 +/- 0.08)

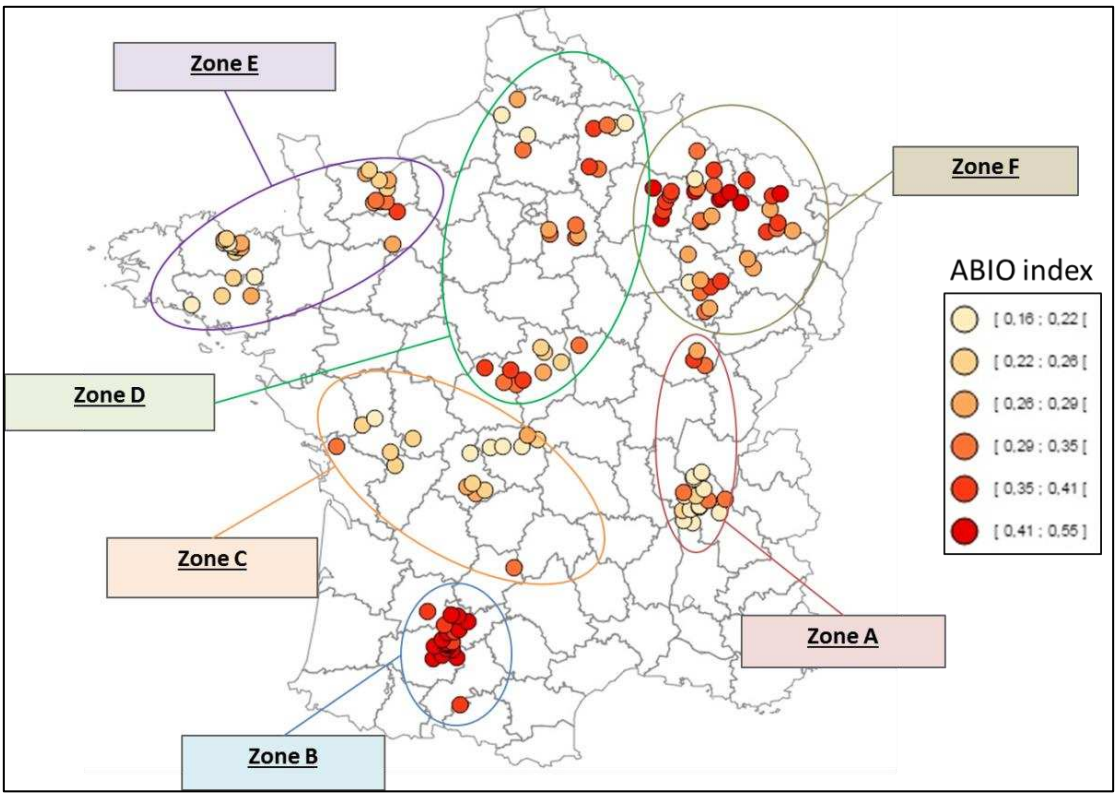
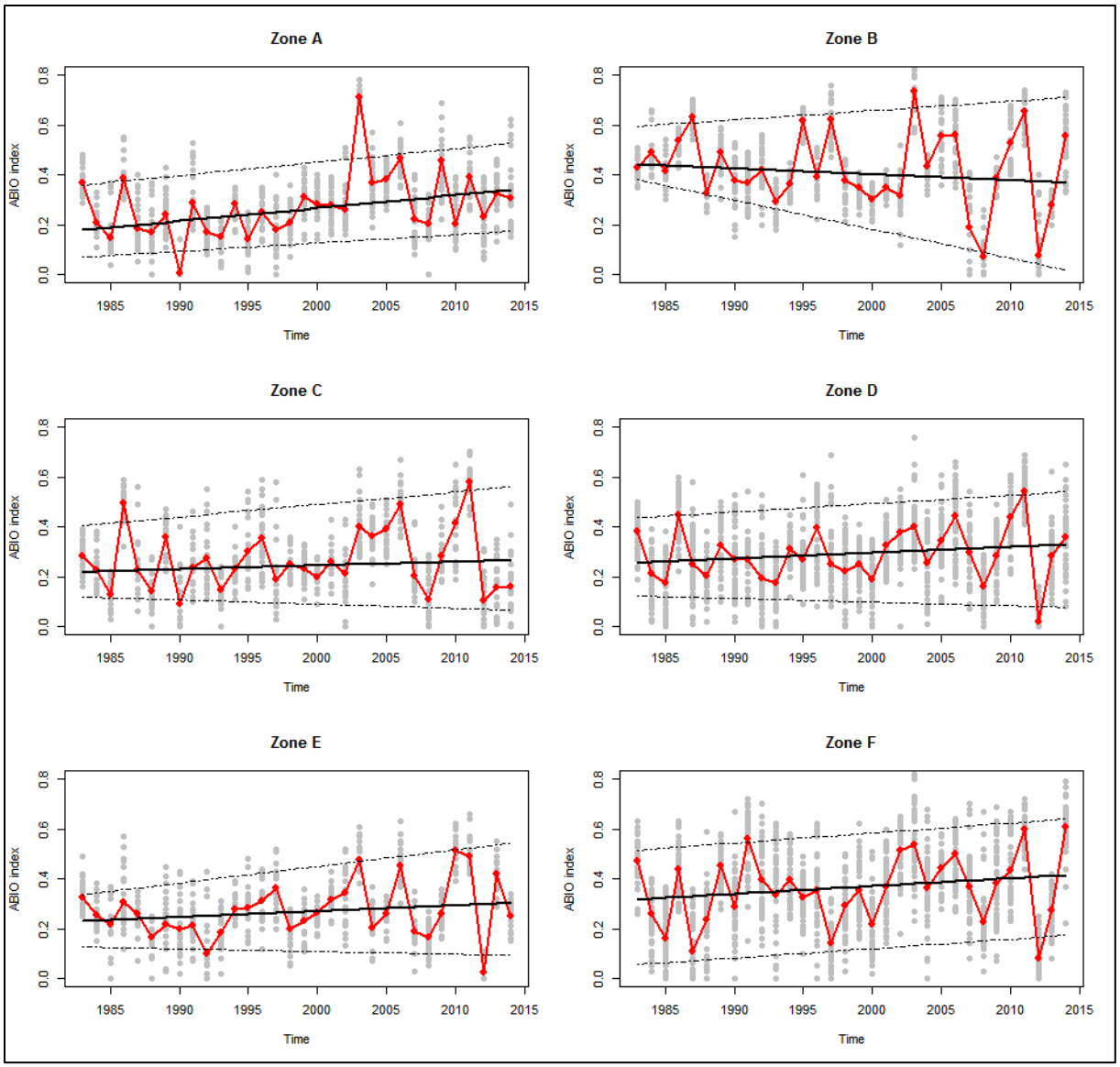


Figure 22 : Geographical distribution of the average ABIO index across the full set of farms and over the period 1983-2014

The temporal variability of the ABIO index in each zone A to F is illustrated by comparing its value for the whole period 1983-2014 and for the three decades 1983-1993, 1994-2004 and 2005-2014. Results are depicted in Table 9 and Figure 23. An upward trend of the intensity of abiotic perturbations was observed in the farms located in east-central France (zone A). A positive trend was also noted in the other wheat-producing environments, with the exception of zone B, but it was not significant from à statistical point of view.



Note: grey dots are ABIO indexes at farm level; red dots are annual average of ABIO index at zone level; black lines are regression lines of ABIO index against time; dotted lines are 10th and 90th quantile regression lines of ABIO index against time.

Figure 23 : Temporal variability of ABIO index in the six wheat-producing environments over the period 1983-2014

The ABIO index also exhibits huge year-to-year variations. To test whether the inter-annual variability of the ABIO index has increased during the period 1983-2014, the rolling variance of the ABIO index was calculated in each wheat-producing environment with different rolling window sizes over the period 1984-2014 (Table 10). Regression results show that the inter-annual variability of the ABIO index has significantly increased in zones B and E. This was true with the five different rolling window sizes. At the opposite, inter-annual variability of ABIO index did not increase in zones A and F. In the remaining zones (C and D), different outcomes have been obtained depending on the window size selected and, therefore, make it difficult to conclude whether or not inter-annual variability of the ABIO index has increased, or not.

Table 9 : Average ABIO index calculated over the three periods 1983-93, 1994-2004 and 2005-2014 and annual growth rate of the index over the whole period 1983-2014 in the six wheat-producing environments

Wheat-producing environments	1983-1993	1994-2004	2005-2014	Annual growth rate of ABIO index of the period 1983-2014
Zone A	0.21 (± 0.11)	0.30 (± 0.15)	0.30 (± 0.10)	**+ 0.005 (*)**
Zone B	0.43 (± 0.10)	0.44 (± 0.15)	0.39 (± 0.22)	- 0.002 (NS)
Zone C	0.24 (± 0.12)	0.27 (± 0.07)	0.29 (± 0.17)	+ 0.002 (NS)
Zone D	0.26 (± 0.09)	0.30 (± 0.07)	0.32 (± 0.15)	+ 0.002 (NS)
Zone E	0.22 (± 0.06)	0.30 (± 0.08)	0.30 (± 0.16)	+ 0.003 (NS)
Zone F	0.34 (± 0.14)	0.35 (± 0.11)	0.39 (± 0.17)	+ 0.003 (NS)

Note 1: Empirical standard deviations of ABIO index in each zone are shown in brackets.
Note 2: Student's t-test of equality to zero of the annual growth rate calculated over the whole period 1983-2014: * significant at P<0.05; NS = not significant.

Table 10 : Results of Student's t-tests used to assess whether the inter-annual variability of the ABIO index has increased in the six wheat-producing environments over the period 1983-2014

	Rolling window sizes				
	2 years	**3 years**	**4 years**	**5 years**	**6 years**
Zone A	NS	NS	NS	NS	NS
Zone B	**(*)**	**(***)**	**(***)**	**(***)**	**(***)**
Zone C	NS	NS	**(*)**	**(*)**	**(*)**
Zone D	NS	**(*)**	**(**)**	**(**)**	**(**)**
Zone E	**(**)**	**(***)**	**(***)**	**(***)**	**(***)**
Zone F	NS	NS	NS	NS	NS

Note: Student's t-test of equality to zero of the coefficient associated with time when rolling variance of ABIO index is regressed against time: *** significant at P<0.001; ** significant at P<0.01; * significant at P<0.05; NS = not significant.

IV. Discussion

In this paper, an original approach was developed to characterize the main abiotic limiting factors of wheat growth and quantify the impacts on yield. Six contrasting wheat-producing environments were identified across the 145 farms of the studied network. The STICS crop model was used to quantify the impacts of annual weather variability on yield and summarize the results as an index of abiotic perturbations (ABIO index).

As a first step, 15 agro-climatic indicators calculated over five phenological phases were used to characterize the main abiotic limiting factors of wheat growth. Agro-climatic indicators derived from climatic variables (e.g. number of frost days, amount of rainfall over a specific period) have been widely used for assessing the suitability of weather for agriculture in a given area and the effects of weather conditions on crop yield (Trnka *et al.*, 2011; Licker *et al.*, 2013; Caubel *et al.*, 2015). In this paper, we used this approach to analyze spatial differences from one farm to another. Results show that each farm is characterized by a specific weather-risk profile, some of them being characterized mainly by water deficit perturbations, others by radiation deficit risks, etc. (see, for example, Gouache *et al.*, 2015 and Ceglar *et al.*, 2016 for other studies on the French context).

The calculation of the 15 agro-climatic indicators over the period 1983-2014 allowed us to discriminate six contrasting wheat-producing environments, corresponding to six contrasting profiles of abiotic limiting factors on wheat yield. Clustering results across France exhibit a strong spatial coherence, gathering farms spatially close to each other into the same environments. Our clustering results are in accordance with previous works based on the same methodologies, such as Maillard *et al.* (2013) in which different wheat-producing environments were identified across France. There are also strong parallels between our clustering results and those of Joly *et al.* (2010) in which different types of climates were identified across France: zone A corresponds to the "semi-continental climate", zone B to "south-western basin climate", zone C to "altered oceanic climate", zone D to "degraded oceanic climate", zone E to "open oceanic climate" and zone F to "mountain climate" (despite low elevation in northeastern France).

Based on clustering results, the STICS crop model was parametrized for each farm and each parcel in order to assess the impacts of weather variability on wheat yield. The main advantage of using a crop model approach is the comprehensive characterization of crop production systems. In particular, using a crop model allows assessing the impacts on yield of successive abiotic perturbations and their interactions with soil characteristics and crop management practices. However, the main disadvantage of using crop models at this large scale is the requirement of an extensive set of input data. More specifically, the STICS model requires a lot of information to describe soil parameters (Le Bas *et al.*, 2015) and yield predictions can be highly sensitive to uncertainty in soil textures (Jégo *et al.*, 2015). Since available data about soil characteristics of the 2,327 parcels did not provide such a high degree of precision, estimates had to be made. It was achieved thanks to the ARVALIS-Institut du Végétal regional soil reference database which describes in each region the parameters of the most representative types of soil.

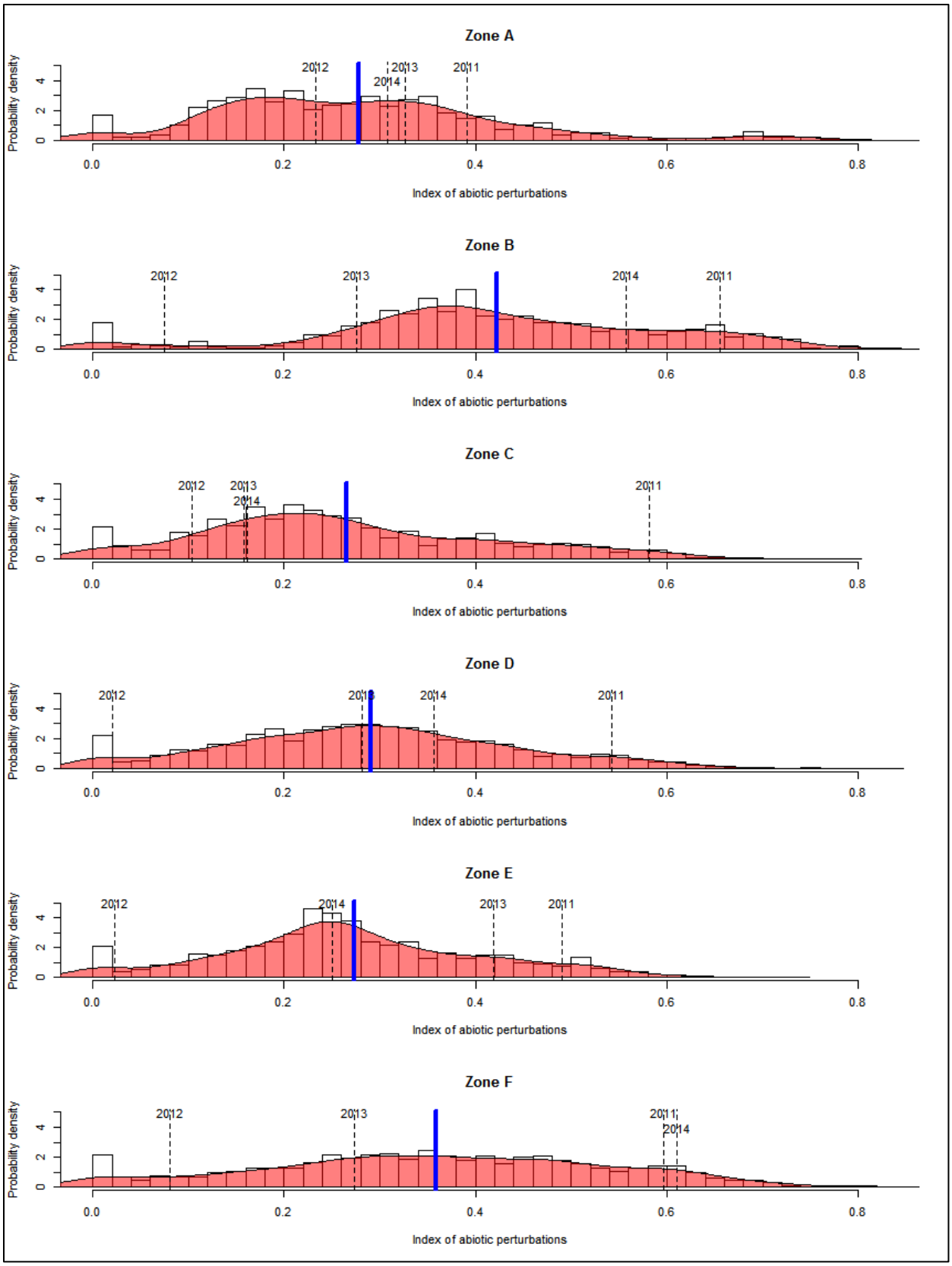
The comparison between observed and simulated yields at regional scale over the period 2011-2014 (Table 7) shows that yield predictions through STICS were fairly accurate despite the lack of precision of soil parameters. This result confirms that large scale implementations of crop models can reproduce average observed yields (Liu, 2009; Balkovič *et al.*, 2013) and that the STICS model performs efficiently under various agro-climatic constraints (Coucheney *et al.*, 2015). This result is

even more remarkable given that the STICS model was not parametrized in order to predict “real’’ yields but to estimate the impacts of weather variability on wheat yields. For each farm, we used average and constant wheat management practices observed in the corresponding wheat-producing environment. In practice, of course, this is not the case because farmers are adjusting yearly management practices according to yield target, meteorological conditions, the use of new varieties and materials, etc. (Meinke and Stone, 1997).

Simulated yields over the period 1983-2014 were used to develop the index of abiotic perturbations (ABIO index). Pearson's correlation coefficients between the ABIO index and the 15 agro-climatic indicators calculated over the same temporal period show that the ABIO index is positively correlated to water deficit and heat stress indicators calculated at the end of wheat cycle. Conversely, it is not correlated, or negatively, to frost, radiation deficit and water excess indicators (see Appendix 3.3 for full details). These results indicate that STICS, in line with other crop models, is capable of capturing the negative impacts of droughts and heat stress on crop yields, while it fails to reproduce negative impacts of heavy rain, frost and very specific perturbations such as radiation deficit, due to poor representations of critical factors affecting plant growth and management (van der Velde *et al.*, 2012). Given that extreme weather events are expected to increase in frequency and perhaps severity in coming decades (IPCC, 2014), improved model representation of crop damage is warranted.

The spatial and temporal variability of the ABIO index was analyzed across the six wheat-producing environments and over the period 1983-2014. Our results show significant differences from one zone to another and from one year to another. In particular, the strongest intensities of abiotic perturbations were found in southwestern and northeastern France due to hotter and drier weather conditions and lower water reserves of soils. We also showed that the average intensity of ABIO index has significantly increased in zone A during the period 1983-2014 and that its inter-annual variability has increased in two other areas (zones B and E). These results are consistent with other studies and confirm that climate changes since the 1990s have produced unfavorable conditions for wheat production in France (Brisson *et al.*, 2010). But, conversely, our results show no significant trend in other wheat-producing environments. This shows that not all regions are affected in a similar way by climate changes. It consequently implies that adaptation measures to climate change will have to be customized region by region.

Over the recent period 2011-2014, farms have been exposed to highly contrasting intensities of abiotic perturbations (see Appendix 3.4 for full details). On average, the ABIO index ranged from 0.09 in 2012 to 0.54 in 2011. This amplitude is the largest in zone B while it was much lower in zone A (Figure 24). In 2011, the ABIO index was higher than the 30-years average in each climate zone, reflecting the very dry conditions during wheat growth cycle. This result is of great importance for the continuation of our work about the robustness of cropping systems to abiotic perturbations because it means that the period 2011-2014 was sufficiently contrasting to apply the robustness framework to the 145 farms of FERMEcophyto network.



Note: red curves are distribution curves of the ABIO index calculated over the period 1983-2014; blue lines are the average intensities of this index over the 30-year period and dotted lines are the average intensities of ABIO index for the four years 2011 to 2014.

Figure 24 : Distribution curve of the ABIO index in the six wheat-producing environments over the period 1983-2014 and results between the years 2011 and 2014

V.Conclusion

In this paper, an original approach was developed to characterize the main abiotic limiting factors on wheat growth and quantify their impacts on wheat yield. This approach was applied to a large network of 145 farms distributed in various regions of France. As a first step, 15 agro-climatic indicators were calculated on specific phenological phases over the period 1983-2014. They have allowed identifying six contrasting wheat-producing environments across the 145 farms. The impacts of weather variability on wheat yield were then assessed through crop modeling and parametrization of STICS model with constant wheat management practices over the period 1983-2014. Temporal variability of simulated yields at farm level was used to construct an index of abiotic perturbations that summarize the impacts of weather variability on wheat yield (ABIO index). Our results show considerable spatial and temporal variability of ABIO index from one wheat-producing environment to another and from one year to another. In particular, we showed that the intensity of abiotic perturbations have increased in one specific zone while inter-annual variability has also increased in two other zones.

This paper provides an original approach based on crop modeling which could be used for other purposes and for longer period of time. Understanding likely effects of weather variability on agricultural productivity at local scale can benefit farmers for tactical management of their crops. Characterization and quantification of abiotic perturbations can also help farmers to develop protective and avoidance strategies that lead to higher yield robustness. To this end, the index of abiotic perturbations could be useful to assess yield robustness of the 145 farms under various weather conditions.

VI. Acknowledgments

We gratefully acknowledge the valuable help of scientists from the INRA Agroclim Unit (Julie Caubel, Inaki Garcia de Cortazar Atauri, Marie Launay and Benoît Persyn) for providing daily climatic data and substantial assistance for the calculation of agro-climatic indicators. We also thank Christine Le Bas (INRA – InfoSol Unit), Christine Le Souder (ARVALIS – Institut du Végétal) and Claire Aumond (InVivo Agrosolutions) for providing soil data and technical assistance for the parametrization of the STICS crop model.

VII. References

Balkovic, J., Van der Velde, M., Schmid, E., Skalsky, R., Khabarov, N., Obersteiner, M., Sturmer, B., Xiong, W., 2013. Pan-European modelling with EPIC: implementation, up-scaling and regional crop yield validation. Agricultural Systems 120, 61-75.

Barnabas, B., Jäger, K., Fehér, A., 2008. The effect of drought and heat stress on reproductive processes in cereals. Plant, Cell & Environment 31, 11-38.

Bray, E.A., Bailey-Serres, J., Weretilnyk, E., 2000. Responses to abiotic stresses. Biochemistry and molecular biology of plants 11581249.

Brisson, N., Gate, P., Gouache, D., Charmet, G., Oury, F.-X., Huard, F., 2010. Why are wheat yields stagnating in Europe? A comprehensive data analysis for France. Field Crops Research 119, 201-212.

Brisson, N., Launay, M., Mary, B., Beaudoin, N., 2008. Conceptual Basis, Formalizations and Parameterization of the STICS Crop Model. Quae Editions, France.

Brisson, N., Ruget, F., Gate, P., Lorgeou, J., Nicoullaud, B., Tayot, X., Plenet, D., Jeuffroy, M.-H., Bouthier, A., Ripoche, D., 2002. STICS: a generic model for simulating crops and their water and nitrogen balances. II. Model validation for wheat and maize. Agronomie 22, 69-92.

Caubel, J., de Cortázar-Atauri, I.G., Launay, M., de Noblet-Ducoudré, N., Huard, F., Bertuzzi, P., Graux, A.-I., 2015. Broadening the scope for ecoclimatic indicators to assess crop climate suitability according to ecophysiological, technical and quality criteria. Agricultural and Forest Meteorology 207, 94-106.

Ceglar, A., Toreti, A., Lecerf, R., Van der Velde, M., Dentener, F., 2016. Impact of meteorological drivers on regional inter-annual crop yield variability in France. Agricultural and Forest Meteorology 216, 58-67.

Chen, C.-C., McCarl, B.A., Schimmelpfennig, D.E., 2004. Yield Variability as Influenced by Climate: A Statistical Investigation. Climatic Change 66, 239-261.

Constantin, J., Beaudoin, N., Launay, M., Duval, J., Mary, B., 2012. Long-term nitrogen dynamics in various catch crop scenarios: Test and simulations with STICS model in a temperate climate. Agriculture, Ecosystems & Environment 147, 36-46.

Coucheney, E., Buis, S., Launay, M., Constantin, J., Mary, B., de Cortázar-Atauri, I.G., Ripoche, D., Beaudoin, N., Ruget, F., Andrianarisoa, K.S., 2015. Accuracy, robustness and behavior of the STICS soil–crop model for plant, water and nitrogen outputs: Evaluation over a wide range of agro-environmental conditions in France. Environmental Modelling & Software 64, 177-190.

Demotes-Mainard, S., Doussinault, G., Meynard, J., 1995. Effects of low radiation and low temperature at meiosis on pollen viability and grain set in wheat. Agronomie 15, 357-365.

Easson, D. L., White, E. M., Pickles, S. J., 1993. The effects of weather, seed rate and cultivar on lodging and yield in winter wheat. The Journal of Agricultural Science 121, 145-156.

Ecophyto Plan, 2008. Réduction des Usages de Pesticides 2008–2018. Available from h u. M(http://agriculture.gouv.fr/IMG/pdf/PLAN_ECOPHYTO_2018-2-2-2_cle8935ee.pdf).

FAO, 2016. FAO Cereal Supply and Demand Brief. Rome.

Fuller, M. P., Fuller, A. M., Kaniouras, S., Christophers, J., Fredericks, T., 2007. The freezing characteristics of wheat at ear emergence. European Journal of Agronomy 26, 435-441.

Gate, P., 1995. Ecophysiologie du blé. Lavoisier, 430 p.

Gate, P., Blondlot, A., Gouache, D., Deudon, O., Vignier, L., 2008. Impacts du changement climatique sur la croissance et le développement du blé en France-Quelles solutions et quelles actions à développer? Oléagineux, Corps gras, Lipides 15, 332-336.

Gouache, D., Bouchon, A.-S., Jouanneau, E., Le Bris, X., 2015. Agrometeorological analysis and prediction of wheat yield at the departmental level in France. Agricultural and Forest Meteorology 209–210, 1-10.

Gurrutxaga, I., Muguerza, J., Arbelaitz, O., Pérez, J.M., Martín, J.I., 2011. Towards a standard methodology to evaluate internal cluster validity indices. Pattern Recognition Letters 32, 505-515.

Holzkämper, A., Calanca, P., Fuhrer, J., 2013. Identifying climatic limitations to grain maize yield potentials using a suitability evaluation approach. Agricultural and Forest Meteorology 168, 149-159.

IPCC, 2014. Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Summary of IPCC Fifth Assessment Report (WGII AR5), 32 p.

Islam, M.A., Alizadeh, B.Z., van den Heuvel, E.R., Bruggeman, R., Cahn, W., de Haan, L., Kahn, R.S., Meijer, C., Myin-Germeys, I., van Os, J., 2015. A comparison of indices for identifying the number of clusters in hierarchical clustering: A study on cognition in schizophrenia patients. Communications in Statistics: Case Studies, Data Analysis and Applications 1, 98-113.

Jégo, G., Chantigny, M., Pattey, E., Bélanger, G., Rochette, P., Vanasse, A., Goyer, C., 2014. Improved snow-cover model for multi-annual simulations with the STICS crop model under cold, humid continental climates. Agricultural and Forest Meteorology 195–196, 38-51.

Jégo, G., Pattey, E., Mesbah, S.M., Liu, J., Duchesne, I., 2015. Impact of the spatial resolution of climatic data and soil physical properties on regional corn yield predictions using the STICS crop model. International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation 41, 11-22.

Joly, D., Brossard, T., Cardot, H., Cavailhes, J., Hilal, M., Wavresky, P., 2010. Les types de climats en France, une construction spatiale. Cybergeo: European Journal of Geography.

Le Bas, C., Coquet, Y., Bardy, M., Faivre, R., Guerif, M., Habets, F., Buis, S., Cousin, I., 2015. Etude méthodologique de l'impact des incertitudes liées à l'estimation spatialisée des paramètres sols du modèle Stics à partir de la Base de Données Géographique des Sols de France à 1/1 000 000. 10. séminaire des utilisateurs et concepteurs du modèle Stics, p. 102 p.

Lecomte, C., 2005. L'évaluation expérimentale des innovations variétales. Proposition d'outils d'analyse de l'interaction génotype-milieu adaptés à la diversité des besoins et des contraintes des acteurs de la filière semences. INAPG (AgroParisTech).

Licker, R., Kucharik, C.J., Doré, T., Lindeman, M.J., Makowski, D., 2013. Climatic impacts on winter wheat yields in Picardy, France and Rostov, Russia: 1973–2010. Agricultural and Forest Meteorology 176, 25-37.

Liu, J., 2009. A GIS-based tool for modelling large-scale crop-water relations. Environmental Modelling & Software, 24, 411-422.

Liu, B., Liu, L., Tian, L., Cao, W., Zhu, Y., Asseng, S., 2014. Post-heading heat stress and yield impact in winter wheat of China. Global change biology 20, 372-381.

Lobell, D.B., Burke, M.B., 2010. On the use of statistical models to predict crop yield responses to climate change. Agricultural and Forest Meteorology 150, 1443-1452.

Luers, A.L., Lobell, D.B., Sklar, L.S., Addams, C.L., Matson, P.A., 2003. A method for quantifying vulnerability, applied to the agricultural system of the Yaqui Valley, Mexico. Global Environmental Change 13, 255-267.

Maechler, M., Rousseeuw, P., Struyf, A., Hubert, M., Hornik, K., 2015. cluster: cluster analysis basics and extensions. R Package version 2.0. 1. There is no corresponding record for this reference.

Mailliard, A., Cadot, V., Ravenel, C., Marques, S., Bossuet, L.M., Masson, F., Lorgeou, J., Du Cheyron, P., Obeuf, A., Picard, A. , Gaufreteau, A., Mistou, M.N., Jeuffroy, M.H., 2013. Diversification du réseau CTPS pour une meilleure caractérisation de l'adaptation des variétés de blé tendre à des itinéraires techniques à hautes performances environnementales. Projet Contrat de branche – Convention C2008-26, 191 p.

Mkhabela, M., Bullock, P., Gervais, M., Finlay, G., Sapirstein, H., 2010. Assessing indicators of agricultural drought impacts on spring wheat yield and quality on the Canadian prairies. Agricultural and Forest Meteorology 150, 399-410.

Meinke, H., Stone, R. C., 1997. On tactical crop management using seasonal climate forecasts and simulation modelling: a case study for wheat. Scientia Agricola 54, 121-129.

Nalley, L. L., Barkley, A. P., Sayre, K., 2009. Photothermal Quotient specifications to improve wheat cultivar yield component models. Agronomy journal 101, 556-563.

National Research Council, 2010. Toward Sustainable Agricultural Systems in the 21st Century. The National Academies Press, Washington D.C., 599 p.

Olesen, J.E., Jensen, T., Petersen, J., 2000. Sensitivity of field-scale winter wheat production in Denmark to climate variability and climate change. Climate Research 15, 221-238.

Ollion, E., 2015. Evaluation de la robustesse des vaches laitières: entre aptitudes biologiques des animaux et stratégies de conduite des éleveurs. INRA. Université Blaise Pascal-Clermont-Ferrand II, Clermont-Ferrand.

Porter, J.R., Semenov, M.A., 2005. Crop responses to climatic variation. Philosophical Transactions of the Royal Society of London B: Biological Sciences 360, 2021-2035.

Priestley, C., Taylor, R., 1972. On the assessment of the surface heat flux and evaporation using large-scale parameters, Mon. Weather Rev. 100, 81–92.

Prost, L., 2008. Modéliser en agronomie et concevoir des outils en interaction avec de futurs utilisateurs: le cas de la modélisation des interactions génotype-environnement et de l'outil DIAGVAR. AgroParisTech.

Quintana-Seguí, P., Le Moigne, P., Durand, Y., Martin, E., Habets, F., Baillon, M., Canellas, C., Franchisteguy, L., Morel, S., 2008. Analysis of near-surface atmospheric variables: Validation of the SAFRAN analysis over France. Journal of applied meteorology and climatology 47, 92-107.

Ruget, F., Satger, S., Volaire, F., Lelièvre, F., 2009. Modeling tiller density, growth, and yield of Mediterranean perennial grasslands with STICS. Crop science 49, 2379-2385.

Saini, H. S., Aspinall, D., 1982. Abnormal sporogenesis in wheat (*Triticum aestivum L.*) induced by short periods of high temperature. Annals of Botany 49, 835-846.

Simelton, E., Fraser, E.D.G., Termansen, M., Forster, P.M., Dougill, A.J., 2009. Typologies of crop-drought vulnerability: an empirical analysis of the socio-economic factors that influence the sensitivity and resilience to drought of three major food crops in China (1961–2001). Environmental Science & Policy 12, 438-452.

ten Napel, J., van der Veen, A.A., Oosting, S.J., Koerkamp, P.W.G.G., 2011. A conceptual approach to design livestock production systems for robustness to enhance sustainability. Livestock Science 139, 150-160.

Thakur, P., Kumar, S., Malik, J., Berger, J., Nayyar, H., 2010. Cold stress effects on reproductive development in grain crops: an overview. Environmental and Experimental Botany 67, 429-443.

Thiry, A.A., Dulanto, P.N.C., Reynolds, M.P., Davies, W.J., 2016. How can we improve crop genotypes to increase stress resilience and productivity in a future climate? A new crop screening method based on productivity and resistance to abiotic stress. Journal of Experimental Botany 67, 5593-5603.

Trnka, M., Olesen, J.E., Kersebaum, K.C., Skjelvåg, A.O., Eitzinger, J., Seguin, B., PELTONEN-SAINIO, P., Rötter, R., Iglesias, A., Orlandini, S., 2011. Agroclimatic conditions in Europe under climate change. Global Change Biology 17, 2298-2318.

Urruty, N., Tailliez-Lefebvre, D., Huyghe, C., 2016. Stability, robustness, vulnerability and resilience of agricultural systems. A review. Agronomy for Sustainable Development 36, 1-15.

van der Velde, M., Tubiello, F., Vrieling, A., Bouraoui, F., 2012. Impacts of extreme weather on wheat and maize in France: evaluating regional crop simulations against observed data. Climatic change 113, 751-765.

Varela, G., 2007. Real Exchange Rate Volatility and Output: A Sectoral Analysis. Unpublished manuscript. United Nations Economic Commission for Latin America and the Caribbean. URL: http://www. cepal. org/redima/noticias/paginas/7/30197/Rd2007_Sur_gonzalo_varelaPDF. pdf.

Zadoks, J.C., Chang, T., Konzak, C., 1974. A decimal code for the growth stages of cereals. Weed research 14, 415-421.

Zheng, B., Chenu, K., Fernanda Dreccer, M., Chapman, S. C., 2012. Breeding for the future: what are the potential impacts of future frost and heat events on sowing and flowering time requirements for Australian bread wheat (*Triticum aestivium*) varieties?. Global Change Biology 18, 2899-2914.

Chapitre 4 : Caractérisation et évaluation de la robustesse du rendement du blé tendre face à des perturbations abiotiques

Ce chapitre se présente sous forme d'article et a été soumis à la revue internationale European Journal of Agronomy *en septembre 2016. Dans ce chapitre, un cadre d'évaluation de la robustesse du rendement du blé tendre face aux perturbations abiotiques est développé et appliqué sur les 145 exploitations agricoles du réseau FERMEcophyto. L'indicateur de perturbations abiotiques défini dans le chapitre précédent est utilisé dans un modèle économétrique afin d'évaluer la robustesse du rendement à l'échelle de chaque système de culture.*

Les résultats économétriques indiquent un « effet système de culture », c'est-à-dire des différences importantes de robustesse d'un système de culture à l'autre. Les performances de chaque système de culture en termes de rendement moyen et de robustesse du rendement face aux perturbations abiotiques sont ensuite étudiées. Quatre profils contrastés sont discriminés à l'échelle de chaque zone géographique puis à l'échelle nationale : les systèmes de culture avec rendement moyen élevé et sensibilité forte vis-à-vis des perturbations abiotiques (Q1), les systèmes de culture avec rendement moyen élevé et sensibilité faible vis-à-vis des perturbations abiotiques (Q2), les systèmes de culture avec rendement moyen faible et sensibilité forte vis-à-vis des perturbations abiotiques (Q3),et les systèmes de culture avec rendement moyen faible et sensibilité faible vis-à-vis des perturbations abiotiques (Q4).

Les caractéristiques de ces différents profils de systèmes de culture sont ensuite étudiées et comparées au regard de trois types de pratiques agronomiques : les pratiques relatives à conduite technique du blé, celles relatives à la succession culturale et, enfin, celles relatives à la flexibilité des pratiques. Les résultats indiquent des différences importantes entre les systèmes de culture à haut versus *faible rendement moyen, notamment en termes de conduite du blé tendre et de succession culturale. En revanche, les différences sont moins nombreuses pour différencier les systèmes de culture à haute* versus *faible robustesse du rendement face aux perturbations abiotiques. Parmi elles, la flexibilité de la conduite technique du blé tendre apparaît comme un facteur clé de l'adaptation des systèmes de culture à un environnement changeant.*

Characterization and assessment of yield robustness in wheat cropping systems exposed to abiotic perturbations

Nicolas Urruty[a,b,], Hervé Guyomard[a], Delphine Tailliez-Lefebvre[c], Christian Huyghe[a]*

(a) INRA, CODIR Agriculture, 147 rue de l'Université, F-75338 Paris, France
(b) University of Poitiers, PRES France Centre Atlantique Université, 15 rue de l'Hôtel Dieu, 86073 Poitiers, France
(c) Agrosolutions, 81 Avenue de la Grande Armée, Paris, France

Abstract

To face increasing uncertainties, future farming systems must be sustainable not only under average or normal conditions but also in extreme climatic and economic situations. Various concepts such as stability, robustness, vulnerability or resilience have been proposed to analyze the ability of agricultural systems to adapt to changing production conditions. The operational effectiveness of these concepts remains nevertheless limited. In this paper, we developed an original analytical framework allowing characterizing and quantifying crop yield robustness, as well as identifying agricultural practices linked to cropping systems differentiated according to their robustness pattern. This framework was applied to 2 300 bread wheat crops belonging to 145 cropping systems in various regions of France over the period 2011-2014. The analysis was performed at the scale of the cropping system. In a first step, we defined an econometric model allowing us to link wheat yield variability to an index of abiotic perturbations constructed using the STICS agronomic model; the cropping systems were taken into account through the use of dummy variables. In a second step, the different cropping systems were positioned within four quadrants using the regional average wheat yield in conditions of normal abiotic perturbations and the regional average estimated robustness to abiotic perturbations as cut-offs for the quadrants. In a third step, the cropping systems of the different spaces defined by the four-quadrant approach were compared on the basis on three types of agronomic practices, i.e., management intensification, rotation and flexibility practices. Empirical results show that abiotic perturbations have an impact on wheat yield variability and this impact differs from one system to another; in other words, there is a cropping system effect of abiotic perturbations on wheat yield robustness. While several management intensification and crop rotations practices differentiate high versus low wheat yield cropping systems, much fewer practices distinguish robust versus sensitive cropping systems.

Key words: Bread wheat yield; robustness; cropping system, abiotic perturbations; agricultural practices.

I. Introduction

Even if hunger is primarily a question of insufficient access to food due to poverty, and even if there is currently enough food worldwide for a sufficient diet for everyone, there is a consensus that global demand for agricultural products will rise significantly by 2050, e.g., by 60% with respect to 2007-09 levels according to the FAO (Alexandratos and Bruinsma, 2012), under the combined effect of demography, urbanization, and economic development. As in the past, the increased demand for food is projected to be satisfied mainly through productivity gains with much more modest changes in crop area and livestock numbers (Godfray *et al.*, 2010). For example, according to the OECD/FAO agricultural outlook 2016-2025, yield improvements should account for 80% of the crop output increase in the next decade (OECD/FAO, 2016). A large part of the huge rise in agricultural production and productivity across the second half of the 20th century can be attributed to the massive use of chemical inputs, notably mineral fertilizers and pesticides (Kropff *et al.*, 2001). However, increasing environmental and health concerns associated with the intensive agricultural production model are prompting more and more research, development, and innovation efforts to define and promote more sustainable farming practices and systems. In many countries, these efforts are accompanied by public policies aimed at reducing pesticide use, nitrate leaching, fossil-fuel energy consumption, biodiversity loss, etc. (Underwood *et al.*, 2013). This is notably the case in the European Union (EU) Member States (MS) within the framework of the successive reforms of the Common Agricultural Policy (CAP).

In this context, considerable debate exists as to whether these alternative farming practices and systems offer better productive, environmental, public health, economic, and social outcomes. This can be illustrated by the expanding literature on organic farming performances: since crop yields are generally lower in organic farming than in conventional agriculture (De Ponti *et al.*, 2012; Seufert *et al.*, 2012), more land is required to produce the same amount of food, leading to unambiguous environmental benefits on a per-hectare basis but more ambiguous gains on a per-unit of product basis or when land use changes are taken into account (Tuomisto *et al.*, 2012). In addition, there are growing concerns about the ability of agricultural systems, whether alternative or conventional, to resist and adapt to unpredictable conditions, such as abnormal weather or economic shocks (Naylor, 2008; Darnhofer *et al.*, 2010).

Concepts such as stability, robustness, vulnerability, and resilience have been developed and applied to assess the ability of agricultural systems to maintain or recover functionality in challenging environments. These concepts have been used both as equivalent notions (National Research Council, 2010) and as ideas to be combined to arrive at a more comprehensive and integrated approach (Callo-Concha and Ewert, 2014). Following Urruty *et al.* (2016), which provided a literature review of the similarities and differences of these four concepts within the agricultural context, this paper uses the concept of robustness as the latter corresponds to the ability of a system and its components (crops, varieties, herds, animals, etc.) to maintain performances in the face of perturbations (ten Napel *et al.*, 2011; de Goede *et al.*, 2013; Urruty *et al.*, 2016). Based on ecological principles, the outstanding management strategy cited in the literature to reduce the impacts of weather variability on crop yields is to increase agroecosystem diversity, including temporal and spatial diversity (Tilman *et al.*, 2006; Lin, 2011; Wezel *et al.*, 2014; Altieri *et al.*, 2015). Although the idea of building robustness has been studied in various agroecosystems (Sabatier *et al.*, 2013) and in livestock systems (ten Napel *et al.*, 2011), it has not been well studied with respect to individual crops. In this paper, we focus on winter wheat yields in cropping systems

in France over the period 2011-2014. We designate as more robust those systems with lower variations or losses in yields in response to specific weather patterns.

Winter wheat (*Triticum aestivum*) is the most important annual crop in France. The increased frequency and magnitude of extreme and adverse agro-climatic events are considered a major threat for wheat production (Trnka *et al.*, 2014). Although many studies have described the effects of wheat management practices and crop rotation characteristics on average yield (Easson *et al.*, 1993; Meynard *et al.*, 2003; Brisson *et al.*, 2010), to our knowledge no one has attempted to explicitly analyze their effects on yield robustness, especially under changing weather conditions. Understanding the role of agricultural practices on crop yield response to environmental perturbations may help in the design of cropping systems able to maintain high yields under abnormal weather scenarios.

To address this question, we used wheat yield, weather, and agronomic data obtained from a large farm network in France surveyed over the period 2011-2014. Yield robustness was studied through an analytical framework that links wheat yields to weather conditions expressed as an index of abiotic perturbations. The framework allowed us to test whether yield sensitivity to abiotic perturbations differs from one cropping system to another. Next, we divided the different cropping systems into four quadrants on the basis of their yield under average or normal conditions (high *versus* low yield) and yield robustness to abiotic perturbations (high *versus* low robustness). Lastly, the effects of management intensification, rotation and flexibility practices on yield robustness were studied.

II. Materials and methods

II.1. Data

Inputs for the analysis of wheat yield robustness were based on a sample of 145 cropping systems corresponding to the same number of farms for which wheat yields, soil characteristics and weather conditions as well as numerous agronomic practices were observed on a total of 2,327 wheat plots over the period 2011 to 2014 (see Appendix 4.1 for more details). All 145 farms are involved in Ecophyto, the French national program intended to significantly reduce agricultural and non-agricultural pesticide use (Ecophyto plan, 2008). The farms are distributed across six contrasting geographical regions as shown in Figure 25 (Urruty *et al.*, 2016, submitted). Information on farm location was used in the analysis to disentangle the impact of geographical conditions on wheat yields in terms of both average levels and robustness. The dataset was provided by the leading French agricultural cooperative group InVivo.

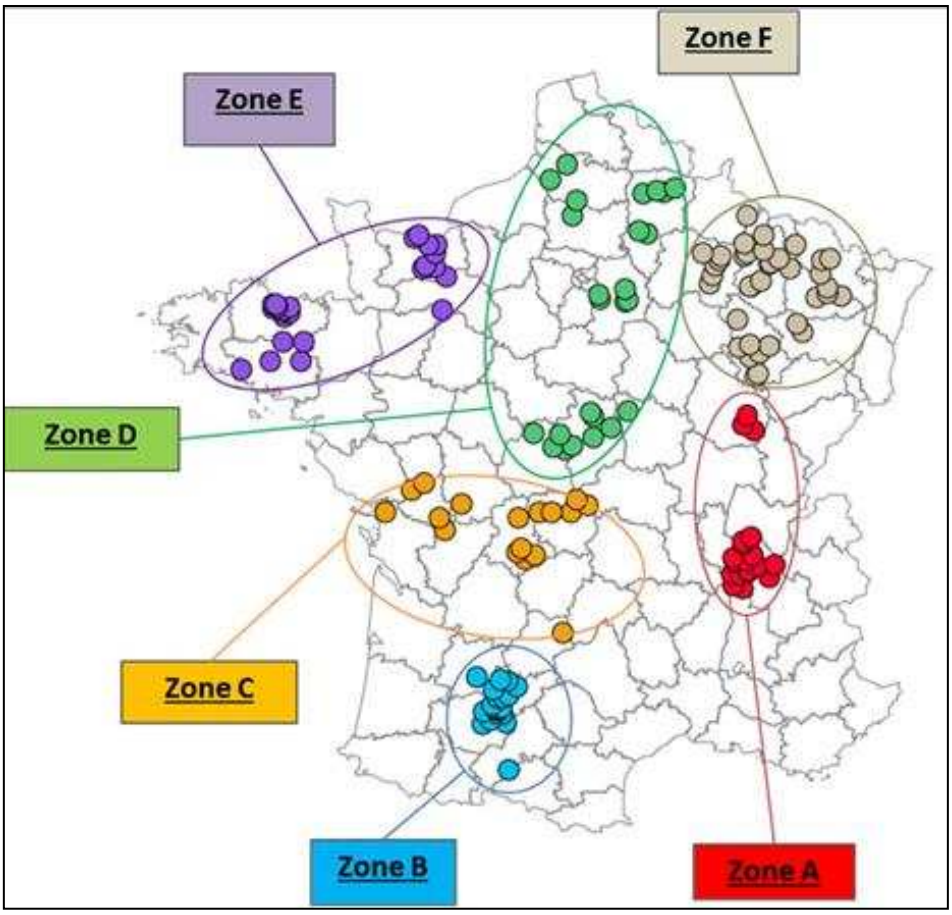


Figure 25 : Geographical distribution of the 145 farms in six geographic regions

Each farm was thus described by one cropping system applied on different wheat plots, i.e., on different types of soils; and in different years, i.e., under variable weather conditions. Each cropping system was characterized by several agronomic practices classified into three groups: management intensification practices (Group 1), rotation practices (Group 2) and flexibility practices (Group 3). These three groups of practices are detailed in Table 11. Group 1 practices include nitrogen management, fungicide and pesticide use, sowing conditions, three wheat variety characteristics, and one variable for tillage practices. Group 2 practices define the rotation in terms of species diversity, preceding crops, and the frequency of wheat, cereals and temporary meadow within the rotation. Group 3 practices are "flexibility practices" measured for each cropping system by the empirical spatial standard deviation of corresponding management intensification practices over the different wheat plots. More specifically, for a given cropping system and a given management intensification practice, the indicator is calculated as the mean over the four years 2011 to 2014 of the standard deviation of this practice measured each year over the different plots[4]. This third group of practices captures farmers' ability to manage in a flexible way their practices because of spatial differences (e.g., soil types, weeds, fungal diseases, etc.). The more a cropping system is flexible, the more management intensification practices vary from one plot to another.

[4] That is: $f_p^k = \frac{\sum_{t=2011}^{2014} \sigma_{p,t}^k}{4}$; where f_p^k is the flexibility of practice p in cropping system k and $\sigma_{p,t}^k$ is the empirical spatial standard deviation of practice p in year t ($t \in$ [2011-2014]) over the different plots of the cropping system k.

Table 11 : Characterization of wheat cropping systems using three groups of agronomic practices

	Practices	Description
Management intensification practices (Group 1)	Total nitrogen rate	Average amount of nitrogen fertilizers (mineral and organic) per hectare (kg/ha)
	Number of nitrogen applications	Average number of nitrogen applications per hectare on the entire wheat crop cycle
	Fungicide use intensity	Average number of fungicide treatments per hectare on the entire wheat crop cycle
	Total pesticide use intensity	Average number of pesticide treatments (fungicides, herbicides, insecticides and others) per hectare on the entire wheat crop cycle
	Sowing date	Average sowing date for wheat
	Sowing density	Average sowing density for wheat per hectare (kg/ha)
	Variety earliness at joint stage	Average earliness score at joint stage of wheat varieties used over the entire wheat crop cycle
	Variety earliness at heading stage	Average earliness score at heading stage of wheat varieties used over the entire wheat crop cycle
	Variety disease resistance	Average disease resistance score of wheat varieties used over the entire wheat crop cycle
	Soil tillage intensity	Average number of soil tillage operations during the entire wheat crop cycle
Rotation practices (Group 2)	Rotation diversity	Average number of different species in the rotation
	Frequency of summer crops	Percentage of wheat preceded by summer crops (maize, sunflower, potato...)
	Frequency of legume crops	Percentage of wheat preceded by legumes (alfalfa, pea, soybean...)
	Frequency of cereals	Percentage of cereals, including wheat, in the rotation
	Frequency of wheat	Percentage of wheat in the rotation
	Frequency of temporary meadow	Frequency of temporary meadow in the rotation
Flexibility practices (Group 3)	Flexibility of total nitrogen rate	Empirical standard deviation of total nitrogen rate between the different wheat plots
	Flexibility of total pesticide use intensity	Empirical standard deviation of total pesticide use intensity between the different wheat plots
	Flexibility of sowing date	Empirical standard deviation of sowing date between the different wheat plots
	Flexibility of sowing density	Empirical standard deviation of sowing density between the different wheat plots
	Flexibility of variety earliness at joint stage	Empirical standard deviation of variety earliness scores at joint stage between the different wheat plots
	Flexibility of variety earliness at heading stage	Empirical standard deviation of variety earliness scores at heading stage between the different wheat plots
	Flexibility of variety disease resistance	Empirical standard deviation of variety disease resistance scores between the different wheat plots

The soil characteristics of each plot were measured by the available water capacity (AWC) defined as the average available water that can be stored in soil and be available for growing crops (Cassel and Nielsen, 1986). Weather conditions were summarized by an index of abiotic perturbations ranging from 0 (lowest theoretical abiotic perturbations) to 1 (highest theoretical abiotic perturbations). This index was calculated for each farm, each type of soil and each year using weather data provided by METEO-France and the STICS crop model (for further details see Urruty et al. 2016, submitted).

II.2. Characterizing wheat yield robustness to abiotic perturbations

The robustness of wheat yields to abiotic perturbations was analyzed by estimating a linear regression model linking wheat yields to the index of abiotic perturbations. The AWC was added as an additional explanatory variable to help capture yield variability linked to differences in soil characteristics. We tested the possibility of a ''cropping system effect'' by differentiating both the index of abiotic perturbations and the AWC at the scale of cropping system using dummy variables to see whether the estimated parameters associated with these dummy variables were statistically significant or not. The estimated model was thus:

$$y_{ikt} = c + [a_k . D(k)] . AWC_i + [b_k . D(k)] . ABIO_{it} \quad (1)$$

where y_{ikt} is the wheat yield of plot i in cropping system k at time t, $D(k)$ is the dummy variable corresponding to the cropping system k, AWC_i is the available water capacity of plot i, and $ABIO_{it}$ is the index of abiotic perturbations for plot i at year t; with t ϵ [2011-2014] and c, a_k and b_k representing the parameters to be estimated.

Each $[c + [a_k . D(k)] . AWC_i]$ term can be interpreted as the maximum wheat yield achievable on plot i using the cropping system k when abiotic perturbations are null. The $[b_k . D(k)]$ parameters capture the sensitivity of the cropping system k to abiotic perturbations. If the estimated parameters b_k were significantly different from a common constant, the sensitivity of wheat yields to abiotic perturbations varied according to the cropping system that was used. In other words, the cropping system influenced the sensitivity of wheat yields to abiotic perturbations. The constancy of the b_k parameters was evaluated using a Fischer test.

II.3. Four patterns of wheat yield robustness

Regression results were then used to define four patterns of wheat yield robustness taking into account both the sensitivity of each cropping system to abiotic perturbations and the average wheat yield attainable by each cropping system under conditions of average or normal abiotic perturbations. We thus used two classification criteria to define four groups of cropping systems.

The first criterion was the wheat yield of each cropping system in normal or moderate or average weather conditions. For each cropping system, Equation (1) was used to estimate wheat yield using the observed soil available water capacity and the average value of the index of abiotic perturbations over the thirty-year period 1983-2014 for the AWC and ABIO variables, respectively. This estimated wheat yield was then used to rank the cropping systems from lowest to highest

estimated yields within each geographical zone A to F (Figure 25). The median value of these estimated wheat yields for each zone was then used to separate the cropping systems into two groups, those with high yields in average weather conditions and those with low yields in average weather conditions.

The second discrimination criterion was provided by the estimated b_k parameters in Equation (1). We proceeded in the same manner, using the median value of this parameter calculated for the different cropping systems within a given geographical zone to separate the cropping systems into two groups, those robust to abiotic perturbations and those sensitive to abiotic perturbations.

On the basis of these two criteria and using their median values defined above as cut-offs, the cropping systems were distributed into four quadrants as shown in Table 12: high yield, high sensitivity (Q1); high yield, low sensitivity (Q2); low yield, high sensitivity (Q3); and low yield, low sensitivity (Q4).

Table 12 : Four patterns of wheat yield robustness

Classification criteria		**Second criterion: Yield sensitivity to abiotic perturbations (estimated b_k parameter)**	
		Below the median of the criterion	**Above the median of the criterion**
First criterion: Wheat yield in normal weather conditions	**Above the median of the criterion**	(Q1) High yield & High sensitivity	(Q2) High yield & Low sensitivity
	Below the median of the criterion	(Q3) Low yield & High sensitivity	(Q4) Low yield & Low sensitivity

II.4. Agronomic characterization of the four quadrants and identification of the main drivers of robustness

The last step of the analysis consisted in comparing the agronomic practices of the four groups of cropping systems defined above on the basis of management intensification, rotation and flexibility practices (as defined in Table 11) in an attempt to explain the different patterns of wheat yield robustness. To arrive at this comparison, each variable defining a management intensification or rotation practice was calculated for each cropping system in reference to its respective regional average. This standardization rule was used in order to perform the analysis at the French national scale while taking into regional particularities that did not depend of the cropping system. This point can be illustrated by the example of the wheat variety earliness. Wheat varieties differ from one zone to another: farms located in northeast France use later varieties, whereas farms in southern France use earlier varieties in order to prevent the risk of heat stress at the end of the cycle (Worland *et al.*, 1994). To test whether wheat variety earliness explains the robustness of wheat yields in one quadrant with regard to another quadrant, it was thus necessary to disentangle this regional effect. This was done by expressing the earliness score of the variety of each cropping system in a given geographical zone, at joint and heading stage, as a percentage from the average value of the earliness score for the region where this cropping system is located. An exception was the variable of sowing date which was calculated in absolute terms (number of days), i.e., as the arithmetic difference between the sowing date of each cropping system and the relevant regional average. Variables corresponding to flexibility practices were not normalized because their values

were already measuring deviations. In addition, flexibility practices are not spatially dependent in the way that management intensification and rotation practices are. For comparative purposes, Wilcoxon signed-rank tests were used.

III. Results

In a first step, Equation (1) was estimated for the 145 cropping systems of the database. We decided not to keep 11 observations corresponding to ''extreme'' cropping systems for which the estimated parameters a_k or b_k were 1.5 times lower than the bottom quartile or 1.5 times upper than the top quartile. We considered that such extreme values did not lie in expected ranges of parameters. Equation (1) was thus finally estimated for 134 cropping systems. Regression results show that the model fits the data relatively well as it explains 74 % of the wheat yield variability as shown by the adjusted R^2 criterion. Many estimated parameters a_k and b_k are statistically different from zero, 45 % (respectively 35 %) for the parameters a_k and 44 % (respectively 36 %) for the parameters b_k at the 10 % level of significance (respectively 5 % level of significance). In addition, the test of constancy of the parameters b_k is not accepted at the 0.1 % level of significance. In other words, regression results show that one can econometrically identify a ''cropping system effect'' explaining part of wheat yield variability (for full statistical results, see Appendix 4.2).

Figure 26 depicts the positioning of the 134 cropping systems across the four quadrants Q1 to Q4 (as defined in sub-section 2.3). In Figure 26, both the average wheat yield in normal conditions of abiotic perturbations and the average wheat yield sensitivity to abiotic perturbations were calculated with respect to their respective average values in the geographical zone where the cropping system (farm) is located. In the same way, all figures in Table 13 were calculated with respect to average values of the geographical zone where the cropping system (farm) is located (see sub-section 2.4 for details and Appendix 4.3 for absolute figures and details at the level of each geographical zone).

Table 13 : Average yield and average yield sensitivity for each pattern of yield robustness

Quadrant	n	Average wheat yield in t/ha	Average wheat yield sensitivity parameter
(Q1) High yield and high sensitivity	33	7.7 (± 1.1)	- 28.7 (± 13.1)
(Q2) High yield and low sensitivity	34	8.2 (± 0.9)	+ 9.6 (± 17.1)
(Q3) Low yield and high sensitivity	34	6.6 (± 1.1)	- 33.6 (± 24.5)
(Q4) Low yield and low sensitivity	33	6.3 (± 1.3)	+ 3.3 (± 16.0)

Note: n is the number of cropping systems per quadrant and the values in brackets are the standard deviations of the estimated criteria in each quadrant

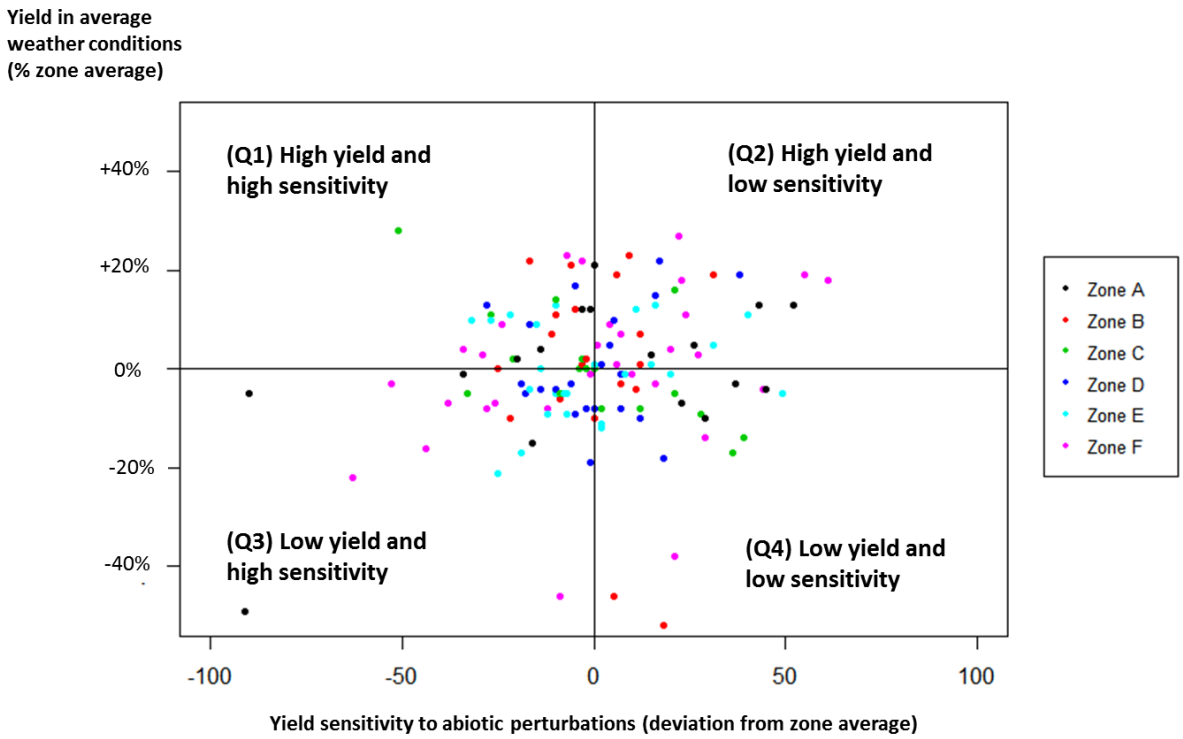


Figure 26 : Wheat yield in average weather conditions (y axis) and wheat yield sensitivity to abiotic perturbations (x axis). For each cropping system, the two criteria are calculated with respect to the mean of the geographical zone A to F to which the cropping

Table 14 presents the average values of agronomic practices used in each cropping system and grouped in three sets of practices (as defined in sub-section 2.4) and Table 15 presents the results of the Wilcoxon signed-rank tests corresponding to the comparison of agronomic practices of cropping systems in one quadrant (or two quadrants) with those of cropping systems in a different quadrant (or two different quadrants).

The first test compares cropping systems with high wheat yields in average weather conditions and cropping systems with low wheat yields in average weather conditions independently of their sensitivity to abiotic perturbations (Q1 and Q2 *versus* Q3 and Q4). Wheat yields in average weather conditions were 11 % greater in Q1 and Q2 (high yields) and 10 % lower in Q3 and Q4 (low yields). The total nitrogen rate, the number of nitrogen applications, the fungicide treatment frequency index (TFI) and the total pesticide TFI were significantly higher in Q1 and Q2 than in Q3 and Q4. The flexibility of total pesticide TFI was also higher in Q1 and Q2 than in Q3 and Q4. Other statistically significant differences were related to sowing density (lower in Q1 and Q2), the flexibility of variety earliness at joint stage (higher in Q1 and Q2), and three variables linked to rotation practices. In Q1 and Q2, rotation length was higher, the presence of legumes as prior crop was higher and the frequency of cereals in rotation was lower. These results suggest that the systems with higher wheat yields under average weather conditions relied more on chemical inputs (nitrogen and pesticides) and used more complex and diversified rotations.

Table 14 : Average relative values of agronomic practices in the four quadrants (values in brackets are empirical standard deviations calculated for each quadrant)

	Agricultural practices	High yield and high sensitivity (Q1)	High yield and low sensitivity (Q2)	Low yield and high sensitivity (Q3)	Low yield and low sensitivity (Q4)
Management intensification practices (Group 1)	Total nitrogen rate	+6% (± 18%)	+8% (± 15%)	-7% (± 22%)	-11% (± 17%)
	Number of nitrogen applications	+4% (± 21%)	+9% (± 16%)	-1% (± 18%)	-10% (± 23%)
	Fungicide use intensity	+11% (± 38%)	+17% (± 28%)	-17% (± 28%)	-19% (± 35%)
	Total pesticide use intensity	+12% (± 36%)	+11% (± 28%)	-9% (± 30%)	-16% (± 33%)
	Sowing date	-1.6 (± 9.8)	+1.3 (± 6.1)	- 0.6 (± 6.3)	+1.6 (± 9.0)
	Sowing density	-5% (± 16%)	0% (± 15%)	0% (± 13%)	+6% (± 15%)
	Variety earliness at joint stage	0% (± 19%)	+1% (± 15%)	+2% (± 30%)	0% (± 20%)
	Variety earliness at heading stage	0% (± 5%)	-1% (± 6%)	0% (± 7%)	+1% (± 6%)
	Variety disease resistance	-1% (± 16%)	-5% (± 17%)	+3% (± 23%)	+3% (± 23%)
	Soil tillage intensity	-1% (± 60%)	+3% (± 63%)	+2% (± 70%)	-6% (± 47%)
Rotation practices (Group 2)	Rotation diversity	-1% (± 27%)	+9% (± 39%)	-8% (± 27%)	-3% (± 30%)
	Frequency of summer crops	-2% (± 25%)	+4% (± 27%)	+1% (± 23%)	+2% (± 23%)
	Frequency of legume crops	0% (± 16%)	+10% (± 24%)	-3% (± 9%)	-6% (± 13%)
	Frequency of wheat	-1% (± 7%)	0% (± 9%)	+1% (± 9%)	-1% (± 9%)
	Frequency of cereals	-2% (± 12%)	-4% (± 12%)	+3% (± 8%)	+3% (± 11%)
	Frequency of temporary meadow	-4% (± 18%)	0% (± 16%)	-1% (± 12%)	+4% (± 19%)
Flexibility practices (Group 3)	Flexibility of total nitrogen rate	8.2 (±8.6)	11.9 (± 12.2)	9.8 (± 8.0)	8.8 (± 7.6)
	Flexibility of total pesticide use intensity	0.3 (± 0.3)	0.6 (± 0.3)	0.4 (± 0.2)	0.3 (± 0.2)
	Flexibility of sowing date	3.7 (± 4.3)	6.1 (± 5.7)	3.2 (± 3.4)	3.6 (± 3.7)
	Flexibility of sowing density	2.1 (± 5.7)	4.0 (± 6.8)	4.6 (± 9.4)	2.8 (± 5.6)
	Flexibility of variety earliness at joint stage	0.4 (± 0.3)	0.4 (± 0.4)	0.3 (± 0.3)	0.4 (± 0.4)
	Flexibility of variety earliness at heading stage	0.2 (± 0.2)	0.2 (± 0.2)	0.1 (± 0.2)	0.2 (± 0.2)
	Flexibility of variety disease resistance	0.6 (± 0.5)	0.7 (± 0.5)	0.6 (± 0.6)	0.7 (± 0.6)

Table 15 : Results of Wilcoxon signed-rank tests used to compare agricultural practices between cropping systems (*** significant at P<0.01, ** significant at P<0.05, * significant at P<0.10, and NS for not significant)

	Practices	High yield (Q1 & Q2) *vs* low yield (Q3 & Q4)	High sensitivity (Q1 & Q3) *vs* low sensitivity (Q2 & Q4)	High yield and high sensitivity (Q1) *vs* High Yield and low sensitivity (Q2)	Low yield and high sensitivity (Q3) *vs* low yield and low sensitivity (Q4)
Management intensification practices (Group 1)	Total nitrogen rate	*** (HY > LY)	*NS*	*NS*	*NS*
	Number of nitrogen applications	*** (HY > LY)	*NS*	*NS*	*NS*
	Fungicide use intensity	*** (HY > LY)	*NS*	*NS*	*NS*
	Total pesticide use intensity	*** (HY > LY)	*NS*	*NS*	*NS*
	Sowing date	*NS*	*NS*	* (Q1 < Q2)	*NS*
	Sowing density	** (HY < LY)	** (HS < LS)	*NS*	** (Q3 < Q4)
	Variety earliness at joint stage	*NS*	*NS*	*NS*	*NS*
	Variety earliness at heading stage	*NS*	*NS*	*NS*	*NS*
	Variety disease resistance	*NS*	*NS*	*NS*	*NS*
	Soil tillage intensity	*NS*	*NS*	*NS*	*NS*
Rotation practices (Group 2)	Rotation diversity	* (HY > LY)	*NS*	*NS*	*NS*
	Frequency of summer crops	*NS*	*NS*	*NS*	*NS*
	Frequency of legume crops	** (HY > LY)	*NS*	*NS*	*NS*
	Frequency of wheat	*NS*	*NS*	*NS*	*NS*
	Frequency of cereals	** (HY < LY)	*NS*	*NS*	*NS*
	Frequency of temporary meadow	*NS*	*NS*	*NS*	*NS*
Flexibility practices (Group 3)	Flexibility of total nitrogen rate	*NS*	*NS*	*NS*	*NS*
	Flexibility of total pesticide use intensity	** (HY > LY)	* (HS < LS)	*** (Q1 < Q2)	*NS*
	Flexibility of sowing date	*NS*	* (HS < LS)	* (Q1 < Q2)	*NS*
	Flexibility of sowing density	*NS*	*NS*	*NS*	*NS*
	Flexibility of variety earliness at joint stage	** (HY > LY)	*NS*	*NS*	*NS*
	Flexibility of variety earliness at heading stage	*NS*	** (HS < LS)	*NS*	* (Q3 < Q4)
	Flexibility of variety disease resistance	*NS*	* (HS < LS)	* (Q1 < Q2)	*NS*

The second test compares the robust and sensitive cropping systems independently of their yield performance under average weather conditions (Q2 and Q4 *versus* Q1 and Q3). In that second comparison, substantially fewer agronomic characteristics were different. The only variables that were statistically different were sowing density, flexibility of total pesticide use, flexibility of sowing date, flexibility of variety earliness at heading stage and flexibility of variety disease resistance which were greater in Q2 and Q4 than in Q1 and Q3. This comparison of robust *versus* non-robust cropping systems independently of yield performances under average weather conditions suggests that a large number of combinations of agricultural practices can be used to increase robustness to abiotic perturbations and that among these, flexibility practices seem to be crucial. In other words, there is no single pattern of wheat yield robustness.

Quadrants Q2 and Q1 allow us to compare robust *versus* sensitive systems with high yields in average weather conditions. Only a few variables were statistically different, i.e., sowing date (later in Q2), flexibility of the total TFI (higher in Q2), flexibility of sowing date (more important in Q2) and flexibility of variety disease resistance (higher in Q2). We can also note that cropping systems in quadrants Q2 and Q1 relied rather intensively on chemical inputs and that systems in Q2 were more complex and diversified than their counterparts in Q1 even if differences were not statistically significant and even if one rotation practice contradicts this observation, i.e., the frequency of wheat in rotation that was higher (although not statistically different) in Q2 than in Q1.

Even fewer agronomic practices differentiated cropping systems in Q3 (low yield, high sensitivity) from those in Q4 (low yield, low sensitivity), with only sowing density and flexibility of variety earliness at heading stage showing a statistical difference (greater in Q4 than in Q3).

IV. Discussion and conclusion

In this paper, we first developed an econometric model allowing us to define and assess wheat yield robustness of wheat cropping systems to abiotic perturbations (Equation (1)). These perturbations were expressed as an index of abiotic perturbations (ABIO index) calculated through the STICS crop model (Brisson *et al.*, 2003). Wheat yield robustness to abiotic perturbations was simply defined by the estimated parameters associated with the ABIO index. The latter as well as the second explanatory variable (the soil available water capacity or AWC) were expressed at the cropping system scale through the use of dummy variables. The soil AWC was used as an additional explanatory variable in order to take into account wheat yield spatial variability among the different cropping systems linked to soil characteristics.

Regression models have been widely used in the scientific literature to study the yield response of crops to various factors (see, for exemple, Chevalier-Gérard *et al.*, 1994; Berzsenyi *et al.*, 2000; Brisson *et al.*, 2010). Despite its simplicity and parsimony, the model developed in Equation (1) is statistically satisfactory, explaining nearly 75 % of wheat yield variability. Furthermore, slightly less than 50 % of estimated parameters associated with the two categories of dummy variables were statistically significant and different. These results highlight that there is a “cropping system effect” and in particular that wheat yield robustness to abiotic perturbations varies from one cropping system to another.

The initial database included 145 cropping systems. However, Equation (1) was estimated for only 134 observations after elimination of 11 cropping systems for which estimated parameters appeared not realistic. It is likely that this equation is too simple to assess properly wheat yield variability for the 11 cropping systems that were not included in the estimation procedure. In addition, several estimated parameters associated with the ABIO index variable were positive, a few of them being positive and statistically greater than zero. Such results are contrary to *a priori* expectations and can also be explained by the simplicity of Equation (1), i.e., an incomplete appreciation of the very numerous factors that influence wheat yield and wheat yield variability. For example, Equation (1) does not include as explanatory variables either the pressure of diseases or the crop protection programs used to fight them. One can reasonably formulate the hypothesis that at least some farmers react to this pressure by increasing their use of pesticides and more generally by relying more intensively on chemical inputs with a likely positive effect on yields. Many other factors such as damages caused by animals are not taken into account as well.

A similar econometric approach could be used for assessing the robustness of other performances to abiotic perturbations, for example the robustness of various economic outcomes. The sensitivity of productive, economic and environmental performances as well as of agronomic practices to other types of disturbances could be even assessed, for example the sensitivity of fungicide use to fungal pressure in an attempt to identify cropping systems able to maintain a low use of fungicides despite increasing fungal pressure. In the two cases aforementioned, it was also econometrically possible to highlight a cropping system effect for the farms of our sample.

The estimated parameters b_k linked to the ABIO index suggest that wheat yield robustness to abiotic perturbations varies considerably from one system to another. This means that the different cropping systems considered here do not stand on an equal footing with regard to abiotic perturbations. Beyond weather conditions and soil characteristics summarized by respectively, the ABIO index and the AWC, it appears that the cropping systems considered in this paper vary also in terms of agronomic practices. This variability of agronomic practices is noteworthy in so far as the farms are all engaged in the Ecophyto network and hence are all committed to substantially reduce pesticide use.

In the second part of the paper, we have thus tried to differentiate and characterize the different cropping systems on the basis of their robustness patterns according to agronomic practices used. To that end, the latter were classified in three groups corresponding to respectively, management intensification, rotation and flexibility practices, and the systems were positioned within four quadrants using the regional average wheat yield in conditions of normal abiotic perturbations and the regional average estimated sensitivity parameter in Equation (1) as cut-offs for the quadrants: high yield, high sensitivity (Q1); high yield, low sensitivity (Q2); low yield, high sensitivity (Q3); and low yield, low sensitivity (Q4). This quadrant method was also used by Long and Ketterings (2016) to analyze yields and yield stability over time of corn and alfalfa/hay mixtures on a 1000-cow dairy farm in Wyoming County, New York.

Several agronomic practices differentiate the cropping systems with high yields (quadrants Q1 and Q2) and the cropping systems with low yields (quadrants Q3 and Q4). Most of differentiating practices correspond to management intensification practices, notably a strong reliance on nitrogen fertilization and pesticides in systems belonging to high yield quadrants Q1 and Q2, as well as three rotation practices. The first result is not surprising and is abundantly documented in the literature

(see, for example, Evans and Fischer, 1999; Oerke, 2006; Spiertz, 2010). The second result is perhaps more interesting as it suggests that the rotations of cropping systems with high yields are more diversified, with more frequently legumes as preceding crops and a lower frequency of cereals. An even more interesting result is that the agronomic practices aforementioned do not differentiate the high *versus* low robustness cropping systems (Table 16). In practice, very few agronomic practices were statistically different when one compares either the high yield cropping systems of quadrants Q1 and Q2, or the low yield cropping systems of quadrants Q3 and Q4, or the robust *versus* sensitive cropping systems independently of their performance in terms of yield levels in average weather conditions (quadrants Q1 and Q3 *versus* Q2 and Q4). Only four agronomic practices are significantly distinct in Q2 w.r.t. to Q1, i.e., sowing date, flexibility of the sowing date, flexibility of the total pesticide TFI and flexibility of variety disease resistance. In the same way, only two practices were statistically different in Q4 w.r.t. Q2, i.e., sowing density and flexibility of variety earliness at heading stage.

Table 16 : Agronomic practices differentiating robust versus sensitive cropping systems

	Robust *versus* sensitive cropping systems		
	High yields	**Low yields**	**All yields**
Discriminatory practices	**Sowing date (R>S)** *Sowing density (R>S)* **Flexibility of the total pesticide TFI (R>S)** **Flexibility of the sowing date (R>S)** *Flexibility of variety earliness at heading stage (R=S)* **Flexibility of variety disease resistance (R>S)**	*Sowing date (R>S)* **Sowing density (R>S)** *Flexibility of the total pesticide TFI (R<S)* *Flexibility of the sowing date (R>S)* **Flexibility of variety earliness at heading stage (R>S)** *Flexibility of variety disease resistance (R>S)*	*Sowing date (R>S)* **Sowing density (R>S)** **Flexibility of the total pesticide TFI (R>S)** **Flexibility of the sowing date (R>S)** **Flexibility of variety earliness at heading stage (R>S)** **Flexibility of variety disease resistance (R>S)**

Note: Statistically significant differences are in bolt; differences not significant are in italics; R>S (respectively R<S) means that the variable considered is greater (respectively lower) for robust cropping systems denoted R than for sensitive systems denoted S.

From these three comparisons, one can conclude that intensification management and rotation practices with the exception of sowing date and density do not allow distinguishing robust *versus* sensitive cropping systems while several of these intensification management and rotation practices differentiate high *versus* low yield wheat cropping systems. In practice, robust *versus* sensitive cropping systems are differentiated by the two sowing variables (date and density) and various flexibility practices. Even when the difference is not significant from a statistical point of view, the most robust cropping systems (Q2 w.r.t. Q1, Q4 w.r.t. Q3, and Q2 & Q4 w.r.t. Q1 & Q3) are characterized by a later sowing date, a higher sowing density, a higher flexibility of the total pesticide TFI (with the exception of low yield systems but the gap is not statistically significant), a higher flexibility of the sowing date, a higher flexibility of variety earliness at heading stage and a higher flexibility of variety disease resistance (Table 16).

These results highlight the power of adjusting sowing dates and densities, phytosanitary protection programs and variety genetic characteristics in reducing exposure to increasing abiotic perturbations and maintaining yield objectives. These results thus echo numerous other studies in which flexibility or plasticity is presented as one essential driver of agricultural systems' robustness (Hanson *et al.*, 2007; Rodriguez *et al.*, 2011; Sabatier *et al.*, 2015). For example, Rodriguez *et al.* (2011) showed that the more flexible farms in Australia had a greater ability to respond to and profit from variability by adjusting practices from year to year and plot to plot.

But these results do not confirm the potential interest suggested by various authors of relying less on chemical inputs as well as diversifying crop rotations for increasing the robustness of cropping systems, even if this reduced sensitivity is obtained at the price of lower yield objectives (Holt-Giménez, 2002; Lin, 2011; Altieri *et al.*, 2015; Gaudin *et al.*, 2015). This point is all the more interesting to note that several intensification management and crop rotation practices differentiate low *versus* high yield cropping systems (Table 16). This lesson does not mean that relying less on chemical inputs and diversifying crop rotations do not allow, at least in some cases, to improve crop yield robustness and more generally productive and economic robustness of farms; let us not forget that our results apply only to a specific sample of French crop farms belonging to the Ecophyto network. One can additionally formulate different assumptions for explaining such a lesson. One possible interpretation is that farmers first set a yield objective to be reached in average or normal weather conditions and only secondly consider the issue of yield robustness to abiotic perturbations (Risbey *et al.*, 1999). A second and not exclusive interpretation can be suggested in connection with the agricultural practices that have been analyzed in this paper. Indeed, several agricultural practices were not documented in the database and therefore not included in the study: nitrogen formulation and timing, phosphorus and potassium inputs, soil management detailed practices, etc. In a similar perspective, beyond agricultural practices, little information was available to describe local cropping conditions, for example soil characteristics other than the AWC (soil compaction, drainage or irrigation materials and operations, etc.) or farmer characteristics (sociological profile, age and position of the farmer in her/his life cycle, education and formation, involvement in professional networks, use of farm advisory services, etc.). A third and again not exclusive interpretation is that our decomposition in four quadrants and thus in only four robustness patterns is too simple. Exploring these three interpretations and very likely other possible explanations are avenues for further research. A final word to remind that our analysis was centered only on wheat yield robustness and that it would be obviously very interesting to extend the work at the scale of the entire crop rotation.

V.References

Alexandratos, N., Bruinsma, J., 2012. World agriculture towards 2030/2050: the 2012 revision. ESA Working paper Rome, FAO.

Altieri, M., Nicholls, C., Henao, A., Lana, M., 2015. Agroecology and the design of climate change-resilient farming systems. Agronomy for Sustainable Development 35, 869-890.

Berzsenyi, Z., Győrffy, B., Lap, D., 2000. Effect of crop rotation and fertilisation on maize and wheat yields and yield stability in a long-term experiment. European Journal of Agronomy 13, 225-244.

Brisson, N., Gary, C., Justes, E., Roche, R., Mary, B., Ripoche, D., Zimmer, D., Sierra, J., Bertuzzi, P., Burger, P., Bussière, F., Cabidoche, Y.M., Cellier, P., Debaeke, P., Gaudillère, J.P., Hénault, C., Maraux, F., Seguin, B., Sinoquet, H., 2003. An overview of the crop model STICS. European Journal of Agronomy 18 (3-4), 309-332.

Brisson, N., Gate, P., Gouache, D., Charmet, G., Oury, F.-X., Huard, F., 2010. Why are wheat yields stagnating in Europe? A comprehensive data analysis for France. Field Crops Research 119, 201-212.

Callo-Concha, D., Ewert, F., 2014. Using the concepts of resilience, vulnerability and adaptability for the assessment and analysis of agricultural systems. Change and Adaptation in Socio-Ecological Systems 1.

Cassel, D., Nielsen, D., 1986. Field capacity and available water capacity. In: Klute, A (Ed.), Methods of Soil Analysis - Part 1. Physical and Mineralogical Methods. Americain Society of Agronomy – Soil Science Society of America, 901-926.

Chevalier-Gérard, C., Denis, J., Meynard, J., 1994. Perte de rendement due aux maladies cryptogamiques sur blé tendre d'hiver. Construction et validation d'un modèle de l'effet du système de culture. Agronomie 14, 305-318.

National Research Council (Ed.), 2010. Toward Sustainable Agricultural Systems in the 21st Century. The National Academies Press, 598 p.

Darnhofer, I., Bellon, S., Dedieu, B., Milestad, R., 2010. Adaptiveness to enhance the sustainability of farming systems. Agronomy Sustainable Development 30, 545-555.

de Goede, D.M., Gremmen, B., Blom-Zandstra, M., 2013. Robust agriculture: Balancing between vulnerability and stability. NJAS - Wageningen Journal of Life Sciences 64–65, 1-7.

De Ponti, T., Rijk, B., Van Ittersum, M.K., 2012. The crop yield gap between organic and conventional agriculture. Agricultural Systems 108, 1-9.

Easson, D., White, E., Pickles, S., 1993. The effects of weather, seed rate and cultivar on lodging and yield in winter wheat. The Journal of Agricultural Science 121, 145-156.

Ecophyto Plan, 2008. Réduction des Usages de Pesticides 2008–2018. Available from h u. M(http://agriculture.gouv.fr/IMG/pdf/PLAN_ECOPHYTO_2018-2-2-2_cle8935ee.pdf).

Evans, L.T., Fischer, R.A., 1999. Yield potential: Its definition, measurement, and significance. Crop Science 39, 1544-1551.

Gaudin, A.C.M., Tolhurst, T.N., Ker, A.P., Janovicek, K., Tortora, C., Martin, R.C., Deen, W., 2015. Increasing crop diversity mitigates weather variations and improves yield stability. PLoS ONE 10, e0113261.

Godfray, H.C.J., Beddington, J.R., Crute, I.R., Haddad, L., Lawrence, D., Muir, J.F., Pretty, J., Robinson, S., Thomas, S.M., Toulmin, C., 2010. Food security: The challenge of feeding 9 billion people. Science 327, 812-818.

Hanson, J.D., Liebig, M.A., Merrill, S.D., Tanaka, D.L., Krupinsky, J.M., Stott, D.E., 2007. Dynamic cropping systems. Agronomy Journal 99, 939-943.

Holt-Giménez, E., 2002. Measuring farmers' agroecological resistance after Hurricane Mitch in Nicaragua: A case study in participatory, sustainable land management impact monitoring. Agriculture, Ecosystems & Environment 93, 87-105.

Kropff, M., Bouma, J., Jones, J., 2001. Systems approaches for the design of sustainable agro-ecosystems. Agricultural Systems 70, 369-393.

Lin, B.B., 2011. Resilience in agriculture through crop diversification: Adaptive management for environmental change. BioScience 61, 183-193.

Long, E.A., Ketterings, Q.M., 2016. Factors of yield resilience under changing weather evidenced by a 14-year record of corn-hay yield in a 1000-cow dairy farm. Agronomy for Sustainable Development 36, 1-9.

Meynard, J.-M., Doré, T., Lucas, P., 2003. Agronomic approach: Cropping systems and plant diseases. Comptes Rendus Biologies 326, 37-46.

Naylor, R., 2008. Managing food production systems for resilience. In: Chapin, F.S., Kofinas, G.P., Folke, C. (Eds.), Principles of natural resource stewardship: Resilience-based management in a changing world. Springer, New-York, p. 46.

OECD/FAO, 2016. OECD-FAO Agricultural Outlook 2016-2025. OECD Publishing.

Oerke, E.-C., 2006. Crop losses to pests. The Journal of Agricultural Science 144, 31-43.

Risbey, J., Kandlikar, M., Dowlatabadi, H., & Graetz, D. (1999). Scale, context, and decision making in agricultural adaptation to climate variability and change. Mitigation and adaptation strategies for global change, 4(2), 137-165.

Rodriguez, D., Power, B., Cox, H., Crimp, S., Meinke, H., 2011. The intrinsic plasticity of farm businesses and their resilience to change - An Australian example. Field Crops Research 124, 157-170.

Sabatier, R., Wiegand, K., Meyer, K., 2013. Production and robustness of a cacao agroecosystem: Effects of two contrasting types of management strategies. PloS ONE 8, e80352.

Sabatier, R., Oates, L.G., Jackson, R.D., 2015. Management flexibility of a grassland agroecosystem: A modeling approach based on viability theory. Agricultural Systems 139, 76-81.

Seufert, V., Ramankutty, N., Foley, J.A., 2012. Comparing the yields of organic and conventional agriculture. Nature 485, 229-232.

Spiertz, J., 2010. Nitrogen, sustainable agriculture and food security. A review. Agronomy for Sustainable Development 30, 43-55.

ten Napel, J., van der Veen, A.A., Oosting, S.J., Koerkamp, P.W.G.G., 2011. A conceptual approach to design livestock production systems for robustness to enhance sustainability. Livestock Science 139, 150-160.

Tilman, D., Reich, P.B., Knops, J.M., 2006. Biodiversity and ecosystem stability in a decade-long grassland experiment. Nature 441, 629-632.

Trnka, M., Rotter, R.P., Ruiz-Ramos, M., Kersebaum, K.C., Olesen, J.E., Zalud, Z., Semenov, M.A., 2014. Adverse weather conditions for European wheat production will become more frequent with climate change. Nature Climate Change 4, 637-643.

Tuomisto, H.L., Hodge, I., Riordan, P., Macdonald, D.W., 2012. Does organic farming reduce environmental impacts? A meta-analysis of European research. Journal of Environmental Management 112, 309-320.

Underwood, E., Baldock, D., Aiking, H., Buckwell, A., Dooley, E., Frelih-Larsen, A., Naumann, S., O'Connor, C., Poláková, J., Tucker, G., 2013. Options for sustainable food and agriculture in the EU. Synthesis report of the STOA Project ''Technology Options for Feeding 10 Billion People''. Institute for European Environmental Policy, London/Brussels.

Urruty, N., Tailliez-Lefebvre, D., Huyghe, C., 2016. Stability, robustness, vulnerability and resilience of agricultural systems. A review. Agronomy for Sustainable Development 36, 1-15.

Wezel, A., Casagrande, M., Celette, F., Vian, J.-F., Ferrer, A., Peigné, J., 2014. Agroecological practices for sustainable agriculture. A review. Agronomy for Sustainable Development 34, 1-20.

Worland, A.J., Appendino, M.L., Sayers, E.J., 1994. The distribution, in European winter wheats, of genes that influence ecoclimatic adaptability whilst determining photoperiodic insensitivity and plant height. Euphytica 80, 219-228.

Chapitre 5 : Analyse de la diversité des systèmes de culture et évaluation de la robustesse du rendement du blé tendre face à des perturbations abiotiques

Ce chapitre se présente sous forme d'article et a été soumis à la revue internationale Field Crops Research *en novembre 2016. Une approche complémentaire à celle utilisée dans le chapitre précédent pour analyser la robustesse du rendement face aux perturbations abiotiques est ici présentée.*

Cette approche est basée sur une typologie des systèmes de culture sur l'ensemble du réseau FERMEcophyto. Six types de systèmes de culture ont été identifiés sur la base de deux types de successions culturales (simplifiée versus *diversifiée) et trois types de conduite technique du blé tendre (conduite intensive et peu flexible, conduite modérément intensive et très flexible, conduite extensive et peu flexible). L'analyse des rendements moyens montrent que les systèmes modérément et fortement intensifs sont les plus productifs lorsque les conditions météorologiques sont « normales ». En revanche, les résultats en termes de robustesse du rendement sont moins marqués et suggère une très grande variabilité à l'intérieur de chaque profil de système de culture. Les systèmes de culture caractérisés par les conduites les plus flexibles ressortent toutefois comme les plus robustes dans cet échantillon d'exploitations. Cela confirme les résultats entrevus dans le chapitre précédent.*

Assessment of wheat yield performances under average and changing weather conditions

Nicolas Urruty[a,b,], Hervé Guyomard[a], Delphine Tailliez-Lefebvre[c], Christian Huyghe[a]*

(a) INRA, CODIR Agriculture, 147 rue de l'Université, F-75338 Paris, France
(b) University of Poitiers, PRES France Centre Atlantique Université, 15 rue de l'Hôtel Dieu, 86073 Poitiers, France
(c) InVivo AgroSolutions, Avenue de la Grande Armée, Paris, France

Abstract

Bread wheat production can suffer from multiple abiotic perturbations, and this effect is liable to increase with future climate change. However, the impacts of rotations and management practices on wheat yield robustness to abiotic perturbations have rarely been investigated. This paper develops a methodological framework based on a statistical typology of wheat cropping systems and an econometric equation relating wheat yield variability to an index of abiotic perturbations. This framework is applied to a sample of French wheat-growing farms participating in the pesticide-reduction plan known as Ecophyto. Our goal is to analyse wheat yield performances under both normal and changing weather conditions. The typology includes six classes of wheat cropping systems differentiated on the basis of two types of rotations (simplified versus diversified) and three types of management practices (high-intensive, inflexible management practices; moderately intensive, flexible management practices; and low- intensive, inflexible management practices). Wheat yield performances in normal or average weather conditions were significantly greater in the high- and moderately intensive cropping systems compared to extensive cropping systems. By contrast, very few differences were statistically significant for wheat yield robustness to abiotic perturbations. This can be explained by the high variability of the robustness parameter within each cluster. However, flexibility emerges as a key lever for increasing wheat yield robustness in the face of changing weather conditions.

Key words: Bread wheat yield; robustness; cropping system, abiotic perturbations; agricultural practices.

I. Introduction

Global food security is threatened by climate change, notably because of its uncertain impacts on crop yields. The positive effects of increased CO_2 concentrations and longer crop growth periods in some latitudes may be counterbalanced by negative consequences linked to changes in temperature and rainfall on water availability, soil degradation, the incidence of pests and diseases, etc. (Kang *et al.*, 2009). While Anwar *et al.* (2007) concluded that climate change could reduce median wheat yields by 25% in south-eastern Australia, Luo *et al.* (2003) suggested that wheat yields could increase under all CO_2 levels in South Australia. Despite these uncertainties, however, there is a

growing consensus that crop production and productivity will be negatively affected by climate change without adaptation of agricultural practices and systems. According to Challinor *et al.* (2014), for example, losses in aggregate production are expected for wheat, maize, and rice in both tropical and temperate regions within a climate change scenario of +2° Celsius, without adaptation. In France, Brisson *et al.* (2010) showed that cereal yields have tended to stagnate since the 1990s essentially because genetic improvements have been counteracted by the unfavourable impacts of climate change, including heat stress during grain fill and drought during stem elongation.

There is thus an urgent need to reduce the sensitivity of current agricultural systems to climate change while at the same time reducing greenhouse gas emissions from agricultural sources. The challenge is unprecedented, and a large number of options have been proposed and are being experimented with worldwide to develop adaptive and mitigating management systems (see, for example, Fuhrer and Gregory (2014)). Another difficulty is that farms must at the same time improve their productivity and economic performance. What is true at the global level also applies in developed countries, such as France, where crop yields are high and agricultural systems are generally intensive, relying heavily on chemical inputs (mineral fertilisers, synthetic pesticides, concentrated feeding stuffs, veterinary pharmaceuticals, etc.).

In this paper, we propose an original analysis of wheat yield performances in France. Our study is based on a typology of wheat cropping systems and an innovative analytical framework that allows us to study the yield performances of contrasting wheat cropping systems under average weather conditions and under variable weather conditions. While a number of researchers have considered the effects of farming characteristics, practices, and systems on average yields (for example, Easson *et al.* (1993); Meynard *et al.* (2003); Brisson *et al.* (2010)), to our knowledge only one study has explicitly focused on wheat yield robustness in French agriculture (Urruty *et al.*, 2016 submitted1).

In that article as in this one, robustness is defined as the capacity of agricultural systems (in this case wheat cropping systems) to maintain yields under changing weather conditions, more specifically changing abiotic perturbations. Urruty *et al.* (2016, submitted1) have shown that the impact of abiotic perturbations on average wheat yields and robustness differ from one wheat cropping system to another, highlighting a "cropping system effect.'' In addition, while several agricultural practices can be statistically related to high- *versus* low-yield wheat cropping systems, fewer practices can be reliably linked to robust *versus* sensitive systems. This paper proposes a deeper analysis of wheat yield performances in French wheat cropping systems, in terms of both yield levels under average weather conditions and yield robustness to changing weather conditions. Toward that end, we rely on a more detailed disaggregation of the cropping systems than that used by Urruty *et al.* (2016, submitted1). The latter distinguished only four categories (high yield/high sensitivity, high yield/low sensitivity, low yield/high sensitivity, low yield/low sensitivity), using average wheat yields in normal weather conditions and average sensitivity of wheat yields to abiotic perturbations as cut-off lines for the four quadrants. In addition, Urruty et al. (2016, submitted1) began with an analysis of wheat yield performances and then sought to assess to what extent performance gaps could be explained by different agronomic practices. In this paper, we begin by defining a typology of wheat cropping systems, and then analyse to what extent the different clusters of this typology exhibit contrasting wheat yield performances.

The remainder of the paper is organised as follows. In part 2, we present the database and frameworks used to define our typology of wheat cropping systems and the robustness of these systems to abiotic perturbations. The typology is original, while the robustness analysis framework was developed and applied in Urruty *et al.* (2016, submitted1). Results are presented in part 3 and discussed in part 4.

II. Materials and methods

II.1. Data

Data inputs were based on a sample of 145 cropping systems corresponding to 145 farms for which wheat yields, soil characteristics, and weather conditions as well as numerous agronomic practices were observed on a total of 2,327 wheat parcels over the period 2011 to 2014 (see Appendix 4.1 for more details). All 145 farms are involved in the French governmental program Ecophyto, intended to significantly reduce agricultural and non-agricultural pesticide use (Ecophyto plan, 2008). The farms are distributed across six geographical regions corresponding to six contrasting climatic zones (Urruty *et al.*, 2016, submitted2). The dataset was provided by the major French agricultural cooperative group InVivo and its member cooperatives.

II.2. Defining a typology for French wheat cropping systems

As proposed by Sebillotte (1990), a cropping system can be described as the combination of a crop succession and a set of management practices used on each crop in the rotation. It follows that defining a typology for the 145 wheat cropping systems in our database can be broken down into three steps. The first step requires describing the main crop rotation practices; it defines a first typology on the basis of rotation practices. The second step involves identifying the key management practices used on the wheat crops; it defines a second typology on the basis of wheat management practices. The third step combines information from steps 1 and 2 to create a full typology of wheat cropping systems on the basis of crop rotation and wheat management practices (Figure 27).

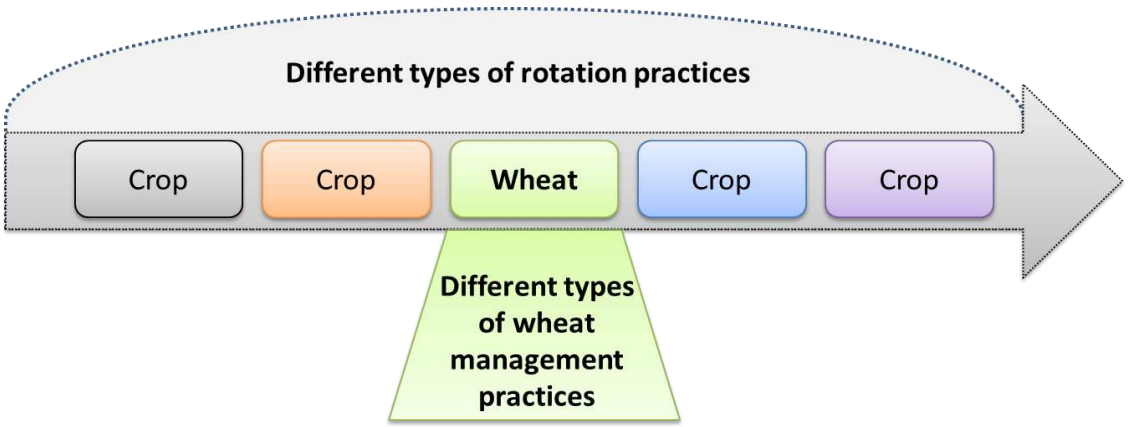


Figure 27 : Defining a wheat cropping system as a combination of crop rotation and wheat management practices

II.2.1. First typology, based on rotation practices (step 1)

Rotation characteristics were described by the set of variables presented in Table 17. In addition to the average number of species in the rotation, two variables sought to take into account the previous crop (respectively, the percentage of wheat preceded by a summer crop and the percentage of wheat preceded by a legume), while two further variables captured the relative importance of cereals and temporary grassland in the rotation. The value of each of these five indicators was normalized by calculating them as the relative percentage difference between the observed value for each cropping system and the average value for that variable in the geographical zone where the farm is located.

To define the first typology based on rotation practices, the five variables in Table 17 were transformed into non-correlated variables using a Principal Component Analysis (PCA). The principal components of the PCA were then used as input variables in an Agglomerative Hierarchical Clustering (AHC). The AHC is a bottom-up approach in which each observation, i.e., each farm, starts in its own cluster, and pairs of clusters are progressively merged as one moves up the hierarchy. At each step of the iteration process, the closest (most similar) pairs of observations are aggregated using the Ward's minimum variance method which minimizes the increase in the total intra-class inertia. The optimal number of clusters was defined on the basis of the Hubert-Levin C index (Hubert and Levin, 1976), which measures, at each iteration, the difference between the maximal intra-cluster distance and the minimal inter-cluster distance (Gurrutxaga *et al.*, 2011; Islam *et al.*, 2015; Tomassen *et al.*, 2016).

A key advantage of combining a PCA and an AHC is that it produces very homogeneous clusters. This approach has been used in several domains, including to define farm typologies (Bellon *et al.*, 2001; Maseda *et al.*, 2004; Blazy *et al.*, 2009).

Table 17 : Variables used to describe rotation practices and construct the first typology

Rotation practice	Acronym	Description
Rotation diversity	ROTA	Average number of species in the rotation
Frequency of summer crops	SUM	Percentage of wheat preceded by a summer crop (maize, sunflower, potato, etc.)
Frequency of legume crops	LEG	Percentage of wheat preceded by a legume (alfalfa, pea, soybean, etc.)
Frequency of cereals	CER	Percentage of cereals, including wheat, in the rotation
Frequency of temporary grassland	MEAD	Frequency of temporary grassland in the rotation

II.2.2. *Second typology, based on wheat management practices (step 2)*

The same approach was used to define a second typology on the basis of wheat management practices. The variables used are presented in Table 18. They can be classed in two groups.

The first group corresponds to management intensification practices: nitrogen management (as measured by two indicators – the average amount of mineral and organic fertilizers applied per hectare and the number of nitrogen applications), total pesticide use (measured by the Treatment Frequency Index, or TFI), sowing date, wheat variety resistance to disease (measured by a score for all wheat varieties), and soil tillage (measured by the average number of soil tillage operations during the entire wheat cropping cycle). All these management intensification practices were calculated in relative terms (relative percentage difference between the observed value for the cropping system and the average value for the variable in the geographical zone where the farm is located).

The second group corresponds to flexibility practices, defined as the spatial variations in the management intensification practices in the first group. Each flexibility practice was calculated as the mean over the four years 2011-2014 of the empirical standard deviation of the corresponding management intensification practice measured each year in the wheat plots. These were not normalized with respect to geographical means since they were calculated from variables already normalized. Flexibility practices capture farmers' ability to manage their wheat plots in a way that is flexible according to the spatial heterogeneity of cropping conditions (Urruty *el al.*, 2016 submitted1).

As with the first typology based on rotation practices, the second typology elaborated from these management practices used first a PCA and next an AHC.

Table 18 : Variables used to describe the wheat management practices and construct the second typology

Wheat management practice	Acronym	Description
Management intensification practices (Group 1)		
Total nitrogen rate	NMIN	Average amount of mineral and organic fertilizers applied per hectare (kg/ha)
Number of nitrogen applications	NFRAC	Average number of nitrogen applications per hectare over the entire wheat crop cycle
Total pesticide use intensity	TFI	Average number of pesticide treatments (fungicides, herbicides, insecticides and others) per hectare over the entire wheat crop cycle
Sowing date	DATE	Average sowing date for wheat
Variety disease resistance	RESI	Average disease resistance score of wheat varieties
Soil tillage intensity	SOIL	Average number of soil tillage operations during the entire wheat crop cycle

Wheat management practice	Acronym	Description
Flexibility practices (Group 2)		
Flexibility of total pesticide use intensity	F_TFI	Empirical standard deviation of total pesticide use intensity across the different wheat plots
Flexibility of sowing date	F_DATE	Empirical standard deviation of sowing date across the different wheat plots
Flexibility of variety earliness at heading stage	F_EARL	Empirical standard deviation of variety earliness scores at heading stage across the different wheat plots

II.2.3. Full typology (step 3)

The third and last step merged the first and second steps to construct a complete typology of wheat cropping systems defined on the basis of both rotation and wheat management practices.

II.3. Assessing wheat yield performances for the different clusters of the full typology

The full typology of wheat cropping systems defined above was then used to assess whether wheat yield performances of the different cropping systems varied from one cluster to another. The wheat yield performances considered were wheat yields in average weather conditions and wheat yield robustness to changing weather conditions. Weather conditions were summarized by an index of abiotic perturbations (Urruty *et al.*, 2016, submitted2) constructed from the STICS crop model (Brisson *et al.*, 2002).

The two variables of interest were calculated from Equation (1) relating wheat yield variability to the index of abiotic perturbations and estimated at the scale of the cropping system:

$$y_{ikt} = c + [a_k . D(k)] . AWC_i + [b_k . D(k)] . ABIO_{it} \qquad (1)$$

where y_{ikt} is the wheat yield of plot i in cropping system k at time t, $D(k)$ is the dummy variable corresponding to the cropping system k, AWC_i is the available water capacity of plot i, and $ABIO_{it}$ is the index of abiotic perturbations for plot i at year t; t ϵ [2011-2014]; and c, a_k and b_k are parameters to be estimated.

Average wheat yields under normal (or moderate) weather conditions for each cropping system were calculated from Equation (1) using the observed water capacity and the average value of the ABIO index over the thirty-year period 1983-2014 in the right-hand side term of this equation. The wheat yield robustness of each cropping system was defined by the estimated parameter b_k.

III. Results

III.1. The typology

III.1.1. Two clusters of wheat cropping systems based on rotation practices

The PCA on rotation practices allowed us to reduce the number of initial variables (five) by selecting the first three components which together explained 84% of the total variance (and the two first explaining 64% of the total variance). The loadings of the initial variables on the first two principal components (Appendix 5.1) allowed us to highlight two features. The first axis discriminated wheat cropping systems with a high frequency of cereals in the rotation from more diversified cropping systems with higher frequencies of legumes as preceding crops. The second axis differentiated wheat cropping systems including temporary grassland in the rotation from those which did not include temporary grassland.

The first three principal components were retained to develop the AHC. The latter led us to define two clusters of wheat cropping systems based on rotation practices (Table 19). Farms belonging to the first cluster (Rotation 1) were characterized by weakly diversified rotations, a lower frequency of legumes as preceding crop, a higher frequency of cereals, and a lower frequency of temporary grassland in the rotation. Farms in the second cluster (Rotation 2) had the opposite features, notably a higher frequency of summer crops and legumes as preceding crops and a lower frequency of cereals in the rotation (variables significantly different from regional averages). One will note with interest that the standard deviations for the five rotation practices were much higher for the second cluster than for the first one.

Table 19 : Rotation characteristics for the two clusters of the first typology, defined from rotation practices

Rotation practice	**Rotation 1 (n = 67)**	**Rotation 2 (n = 67)**
Diversity of the rotation (ROTA)	-19 % (+/- 16 %) ***	+19 % (+/- 38 %) *NS*
Frequency of summer crops as preceding crop (SUM)	-2 % (+/-22 %) *NS*	+5 % (+/- 27 %) *
Frequency of legumes as preceding crop (LEG)	-8 % (+/- 6 %) ***	+9 % (+/- 21 %) ***
Frequency of cereals in the rotation (CER)	+5 % (+/- 9 %) ***	-5 % (+/- 11 %) ***
Frequency of temporary grassland in the rotation (MEAD)	-3 % (+/- 4 %) ***	+ 3 % (+/- 22 %) *NS*

Note 1: n is the number of observations; values shown are the average percent difference with respect to regionalized averages followed by the empirical standard deviation of the gap (in brackets).

Note 2: Student's t-test of equality to zero of the variable: *** significant at P<0.01; ** significant at P<0.05; * significant at P<0.10; NS = not significant.

III.1.2. Three clusters of wheat cropping systems based on wheat management practices

The five first components of the PCA on wheat management practices explained 75% of the total variance. The loadings of the nine initial variables onto the first two components, which explained 46% of the total variance, allowed us to highlight two characteristics (Appendix 5.1). The first axis differentiated the wheat cropping systems using intensive management practices and notably relying heavily on chemical inputs, from the cropping systems using lower rates of fertilisers and pesticides, later sowing dates, and more disease-resistant wheat varieties. The second axis differentiated more flexible from less flexible management practices.

The five first principal components of the PCA were then used to develop the ACH. The latter allowed us to distinguish three clusters (Table 20). The wheat cropping systems belonging to the first cluster (Management 1) used more total nitrogen, more nitrogen applications and more pesticides. Sowing dates were earlier, varieties were less disease-resistant, and soil tillage operations were more frequent. Farms in this first cluster were also less flexible, the flexibility being measured by the spatial variation of total pesticide use, sowing date, and variety earliness at heading stage.

Table 20 : Management practice characteristics in the three clusters of the second typology, defined from management practices

Wheat management practice	Management 1 (n = 41)	Management 2 (n = 62)	Management 3 (n = 31)
Management intensification practices (Group 1)			
Total nitrogen rate	+6 % (± 11%) ***	+6 % (± 16%) ***	-24 % (± 19%) ***
Number of nitrogen applications	+10 % (± 15%) ***	+5 % (± 15%) ***	-20 % (± 22%) ***
Total pesticide use intensity	+13 % (± 31%) ***	+4 % (± 31%) *NS*	-27 % (± 31%) ***
Sowing date	-3.7 (± 7.7) ***	+1.9 (± 7.1) **	+1.9 (± 7.7) *
Variety disease resistance	-4 % (± 18%) *	+0 % (± 12%) *NS*	+5 % (± 32%) *NS*
Soil tillage intensity	+22 % (± 49%) ***	+2 % (± 54%) *NS*	-36 % (±73%) ***
Flexibility practices (Group 2)			
Flexibility of total pesticide use intensity	0.29 (± 0.2) ***	0.59 (± 0.3) ***	0.19 (± 0.2) ***
Flexibility of sowing date	2.9 (± 3.3) ***	6.2 (± 4.9) ***	1.8 (± 3.3) ***
Flexibility of variety earliness at heading stage	0.10 (± 0.2) ***	0.23 (± 0.3) ***	0.19 (± 0.3) *NS*

Note 1: n is the number of observations; values shown are average percent difference with respect to regionalized averages, with empirical standard deviations given in brackets.

Note 2: Student's t-test of the equality of the variable to zero (first group) or to the standard deviation calculated over the full set of wheat cropping systems (second group, the reference standard deviations are equal to 0.41, 4.2 and 0.18, respectively): *** significant at P<0.01; ** significant at P<0.05; * significant at P<0.10; NS = not significant.

Farms in the second cluster (Management 2) were also characterized by intensive management practices, but to a lesser extent than the farms in the first cluster. Farms in the second cluster also used management intensification practices in a more flexible way. The cropping systems of the third cluster (Management 3) were characterized by low-intensity (extensive) management practices. It is interesting to note that no cluster of cropping systems characterized by extensive, flexible management practices emerged from the automatic classification.

III.1.3. The full typology

By combining the two partial typologies, we ultimately defined six clusters of wheat cropping systems: simplified rotation, high-intensive, low-flexibility management practices (R1M1); diversified rotation, high-intensive, low-flexibility management practices (R2M1); simplified rotation, moderate-intensive, high-flexibility management practices (R1M2); diversified rotation, moderate-intensive, high-flexibility practices (R2M2); simplified rotation, low-intensive, low-flexibility management practices (R1M3); and diversified rotation, low-intensive, low-flexibility management practices (R2M3).

Average characteristics of the six clusters in terms of rotations, management intensification, and flexibility practices are detailed in Table 21. In each cluster, a large majority of variables were significantly different from zero (rotation and management intensification practices, expressed here as the relative percentage difference with respect to regionalized means), or from the average standard deviation of the variable calculated over the full sample of farms (flexibility practices). This means that the typology approach was successful in differentiating contrasting cropping systems on the basis of the variables employed.

Figure 28 presents their geographical distribution across six zones, designated A through F. The unequal numbers of farms in each cluster (ranging from 13 in R2M3 to 31 in both R1M2 and R2M2) and each region (from 17 in zone C to 30 in zone F) means that the map in Figure 28 must be interpreted with caution. Nevertheless, the following points may be highlighted. There was no cropping system belonging to clusters R1M3 or R2M3 in the lowland zone B (southwestern France), where all farms in the sample were managed in a relatively intensive way. Similarly, in zone D (north-central France), only two farms of the type R2M3 were identified. The two extensive clusters R1M3 and R2M3 were proportionally well represented in zones A, C, and F, largely made up of intermediate or mountainous areas. These three zones were also characterized by a higher presence of diversified rotations compared to the territory overall.

Table 21 : Rotation and wheat management practices in the six clusters of the full typology

Practices	Rotation 1 & Management 1 (n = 18)	Rotation 2 & Management 1 (n = 23)	Rotation 1 & Management 2 (n = 31)	Rotation 2 & Management 2 (n = 31)	Rotation 1 & Management 3 (n = 18)	Rotation 2 & Management 3 (n = 13)
Rotation practices						
Rotation diversity	-18% (± 14%) ***	+25% (± 46%) *NS*	-16% (± 17%) ***	+30% (± 29%) **	-24% (± 13%) ***	-15% (± 18%) ***
Frequency of summer crops	-15% (± 15%) ***	+3% (± 35%) *NS*	-7% (± 16%) **	+7% (± 23%) *	+17% (± 22%) ***	+4% (± 19%) *NS*
Frequency of legume crops	-6% (± 6%) ***	+13% (± 24%) **	-8% (± 5%) ***	+6% (± 20%) *	-8% (± 7%) ***	+9% (± 18%) *
Frequency of cereals	+3% (± 7%) *	-6% (± 12%) **	+3% (± 9%) *	-8% (± 9%) **	+11% (± 7%) ***	+4% (± 9%) *
Frequency of temporary grassland	-2% (± 4%) **	+4% (± 23%) *NS*	-4% (± 4%) ***	-6% (± 15%) **	-1% (± 3%) *	+21% (± 25%) ***
Management intensification practices						
Total nitrogen rate	+6% (± 11%) **	+6% (± 12%) **	+4% (± 13%) *	+8% (± 18%) *	-27% (± 18%) ***	-19% (± 20%) ***
Number of nitrogen applications	+11% (± 12%) ***	+10% (± 18%) ***	+1% (± 14%) *NS*	+8% (± 15%) ***	-21% (± 19%) ***	-21% (± 24%) ***
Total pesticide use intensity	+3% (± 24%) *NS*	+22% (± 32%) ***	+4% (± 31%) *NS*	+5% (± 30%) *NS*	-17% (± 28%) **	-41% (± 30%) ***
Sowing date	-2.4 (± 4.6) **	-4.6 (± 9.3) **	+1.8 (± 6.3) *	+1.9 (± 7.8) *	+0.5 (± 5.8) *NS*	+3.8 (± 9.5) *
Variety disease resistance	-3% (± 17%) *NS*	-5% (± 19%) *NS*	-1% (± 14%) *NS*	+1% (± 10%) *NS*	+8% (± 27%) *NS*	+1% (± 37%) *NS*
Soil tillage intensity	+21% (± 43%) **	+23% (± 53%) **	+6% (± 52%) *NS*	-2% (± 55%) *NS*	-44% (± 88%) **	-25% (± 42%) **
Flexibility practices						
Flexibility of total pesticide use intensity	0.32 (± 0.2) *	0.27 (± 0.2) ***	0.60 (± 0.3) ***	0.57 (± 0.3) ***	0.19 (± 0.2) ***	0.20 (± 0.2) ***
Flexibility of sowing date	3.8 (± 3.8) *NS*	2.3 (± 2.6) ***	6.1 (± 5.0) **	6.3 (± 4.7) **	1.5 (± 1.6) ***	2.3 (± 4.6) *
Flexibility of variety earliness at heading stage	0.10 (± 0.1) ***	0.11 (± 0.2) **	0.22 (± 0.2) *	0.24 (± 0.1) **	0.18 (± 0.2) *NS*	0.21 (± 0.2) *NS*

Note 1: n is the number of cropping systems; values shown are the average percent difference with respect to regionalized averages (empirical standard deviation shown in brackets).

Note 2: Student's t-test of the equality of the variable to zero (rotation and management intensification practices) or to the average standard deviation calculated over the full set of wheat cropping systems (flexibility practices, the reference standard deviations are equal to 0.41, 4.2 and 0.18, respectively): *** significant at P<0.01; ** significant at P<0.05; * significant at P<0.10; NS = not significant.

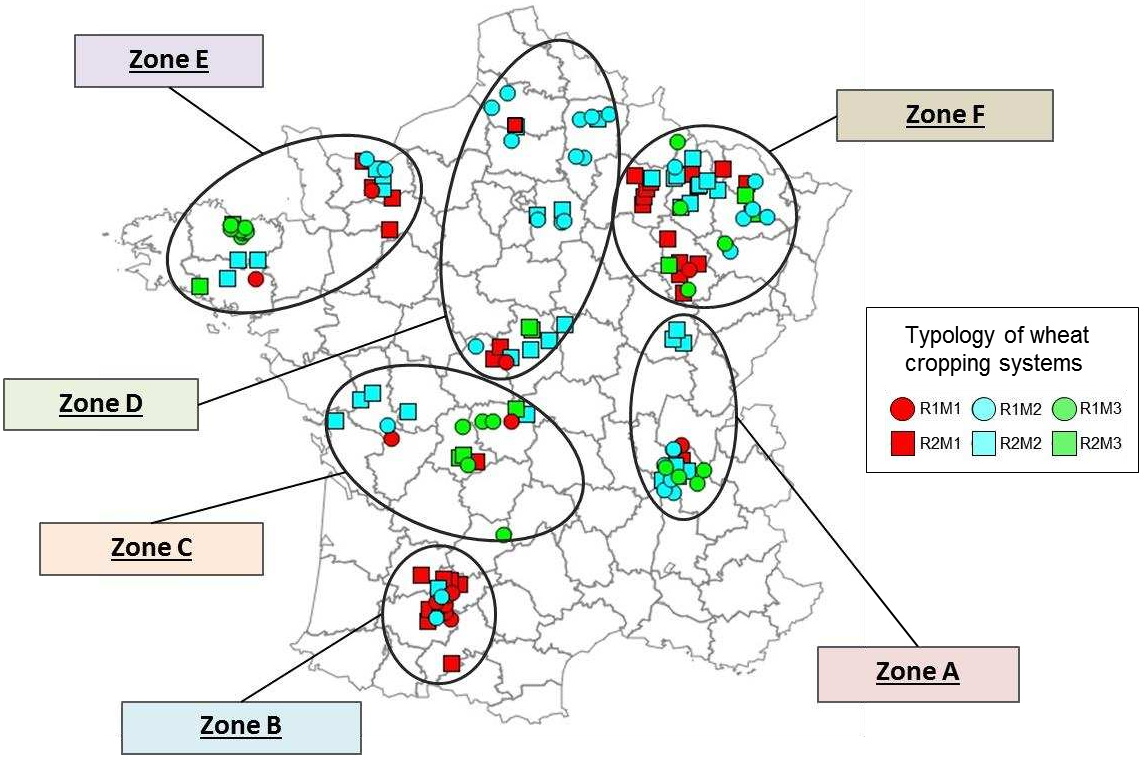


Figure 28 : Geographical distribution of the six clusters in the full typology

III.2. Yield performances

III.2.1. Estimation of Equation (1)

Equation (1) was estimated for the 145 cropping systems in the database. We decided to eliminate 11 observations corresponding to ''extreme'' cropping systems for which the estimated parameters a_k or b_k were 1.5 times lower than the bottom quartile or 1.5 times greater than the top quartile, considering that such extreme values lay outside the expected ranges of parameters. Equation (1) was thus finally estimated for 134 cropping systems. Regression results show that the model fits the data relatively well, explaining 74% of wheat yield variability (for more details, see Appendix 4.2 and/or Urruty et al. 2016, submitted1).

III.2.2. Wheat yield performances for the six clusters in average weather conditions

Equation (1) was used to estimate wheat yields for the 134 wheat cropping systems under conditions of average abiotic perturbations (hereafter average yields). The objective of this first analysis was to ask to what extent average wheat yields were different across the six clusters. Results are presented in Table 22. In column 2, the means of the average yields calculated in each cluster are compared to equivalent yields calculated over the whole sample of 134 wheat cropping systems. The remaining columns show the pair-wise comparison of means among the six different clusters.

Table 22 : Mean wheat yields under average weather conditions and pair-wise comparisons among the six clusters

Six clusters	Mean yields	*vs* R1M1	*vs* R2M1	*vs* R1M2	*vs* R2M2	*vs* R1M3	*vs* R2M3
R1M1	+1 % (± 9%) NS						
R2M1	**+6 % (± 12%) ****	NS					
R1M2	+2 % (± 10%) NS	NS	NS				
R2M2	**+5 % (± 10%) ****	NS	NS	NS			
R1M3	**-8 % (± 16%) ****	**R1M3<R1M1 (*)**	**R1M3<R2M1 (***)**	**R1M3<R1M2 (**)**	**R1M3<R2M2 (***)**		
R2M3	**-13 % (± 22%) ****	**R2M3<R1M1 (**)**	**R2M3<R2M1 (***)**	**R2M3<R1M2 (***)**	**R2M3<R2M2 (***)**	NS	

Note 1: Yields in column 2 are expressed in reference to average yields (percent deviation) for the region in which the cropping systems are located. (figures in brackets correspond to the empirical standard deviation of the mean in each cluster). Student's t-test of the equality to zero of the mean: *** significant at P<0.01; ** significant at P<0.05; * significant at P<0.10; NS = not significant.

Note 2: RiMj < RkMl means that average yields in cluster RiMj are significantly lower that their equivalents in cluster RkMl with a probability P<0.01 (***), P<0.05 (**) and P P<0.10 (*), or NS if not significant.

From column 2 of Table 22, we see that average yields in the two clusters corresponding to extensive wheat cropping systems, whether they included simplified or diversified rotations (clusters R1M3 and R2M3), were significantly lower than regionalized average wheat yields calculated over the sample of 134 wheat cropping systems. We also see that the means of average yields in the two intensive clusters with diversified rotations, whether managed flexibly or inflexibly (clusters R2M2 and R2M1), were significantly greater than the mean calculated over the sample of the 134 farms. The opposite was true for the cropping systems belonging to cluster R2M3, corresponding to more diversified rotations and more extensive management intensification practices.

The comparisons of the means among the six clusters allows us to go one step further by highlighting that extensive management practices with more or less diversified rotations (clusters R1M3 and R2M3) led to lower average yields compared to more intensive management practices. By contrast, no significant differences were found from the pairwise comparison of clusters R1M1 and R2M1, nor from the comparison of clusters R1M2 and R2M2 (no impact of rotation characteristics on average wheat yields when wheat crops are managed relatively intensively, with or without flexibility). Similarly, no significant differences were found from the pairwise comparison of clusters R1M1 and R1M2 or R2M1 and R2M2 (no impact of flexibility practices on average wheat yields when wheat crops are managed relatively intensively, with or without diverse rotations).

III.2.3. Wheat yield robustness to abiotic perturbations for the six clusters

We proceeded in the same way to analyse to what extent wheat yield robustness to abiotic perturbations (hereafter wheat yield robustness) differed across the six clusters. Results are presented in Table 23. Regionalized means of estimated parameters are presented in column 2, and results of pair-wise comparisons between the different clusters are presented in the remaining columns.

Table 23 : Mean wheat yield robustness to abiotic perturbations and pair-wise comparisons among the six clusters

Six clusters	Mean yield robustness	*vs* R1M1	*vs* R2M1	*vs* R1M2	*vs* R2M2	*vs* R1M3	*vs* R2M3
R1M1	- 2.9 (± 13.9) *NS*						
R2M1	- 6.1 (± 23.7) *NS*	NS					
R1M2	+ 2.4 (± 24.4) *NS*	*NS*	*NS*				
R2M2	**+ 6.7 (± 23.7) ***	*NS*	**R2M2 > R2M1 (***)**	*NS*			
R1M3	- 3.5 (± 28.9) *NS*	*NS*	*NS*	*NS*	*NS*		
R2M3	- 2.1 (± 33.8) *NS*	*NS*	*NS*	*NS*	*NS*	*NS*	

Note 1: Robustness "coefficients" of each cluster in column 2 are expressed as the absolute difference between the associated estimated parameter b_k and the average of the estimated parameters b_k for all cropping systems in the relevant zone (figures in brackets correspond to the empirical standard deviation of the mean for each cluster). Student's t-test of the equality to zero of the mean: *** significant at P<0.01; ** significant at P<0.05; * significant at P<0.10; NS = not significant.

Note 2: RiMj < RkMl means that yield robustness in cluster RiMj is significantly lower that its equivalent in cluster RkMl with a probability P<0.01 (***), P<0.05 (**) and P P<0.10 (*), or NS if not significant.

Essentially, what emerges from the analysis of wheat yield robustness to abiotic perturbations is that very few statistical tests were successful. This small number of significant tests is explained by the high variability of robustness parameters in each cluster. Only cropping systems of the cluster R2M2 – corresponding to diversified rotations, moderately intensive, highly flexible management practices appeared less sensitive to abiotic perturbations than the regionalized mean.

The pairwise comparison of clusters shows that yield robustness for cluster R2M2 was higher than for cluster R2M1. This was true for both the mean and the median (see Appendix 5.2 for the medians). When rotations were rather diversified and management practices rather intensive, flexibility (cluster R2M2) increased wheat yield robustness to abiotic perturbations. This positive impact of flexibility on wheat yield robustness is confirmed by two other significant comparisons: the median

comparison of clusters R2M2 and R1M1 on the one hand, and of clusters R1M2 and R2M1 on the other. In these last two situations, however, the median comparison test was not confirmed by the mean comparison test and the pairwise comparison entailed not only differences in flexibility practices but also in rotation practices, in addition to ''opposite'' effects. In the first case (R2M2 vs. R1M1), flexibility and diversification led to increased robustness, while in the second case (R1M2 vs. R2M1), the flexible, specialised wheat cropping systems were more robust than the inflexible, diversified wheat cropping systems, all farms being conducted relatively intensively. A last result deserves to be put forward, namely that no significant differences were found when one of the comparison clusters was from the extensive type M3. This result contrasts with those derived from the pairwise comparison of average wheat yields, which were lower with more extensive management intensification practices (Table 22).

IV. Discussion

In this paper, we analysed two key performances of wheat cropping systems – wheat yields under conditions of normal or average abiotic perturbations and wheat yield robustness to abiotic perturbations – on the basis of a typology of those cropping systems. The typology was derived from a statistical analysis of a set of agricultural practices organized in three groups (rotations, management intensification, and flexibility practices) and collected from a sample of French wheat farms participating in the Plan "Ecophyto," aimed at reducing pesticide use in French agriculture. Six clusters of cropping systems were identified, beginning with rotation practices, which allowed us to distinguish highly diversified (type R1) vs. minimally diversified (type R2) rotations. Three classes of management practices were then defined, corresponding to highly intensive management practices applied inflexibly (type M1), moderately intensive management practices applied flexibly (type M2), and low-intensive management practices applied inflexibly (type M3). Interestingly, the sample and the typology did not allow us to identify a homogenous group of wheat cropping systems implementing low-intensive, flexible management practices.

A large number of studies have sought to compare the productive, economic, and/or environmental performances of different farms or types of farms. A variety of approaches can be used to that end, including approaches based on typologies. There are numerous ways to construct and define a typology, including statistical methods such as the one used in this paper (for other examples see Schmidt *et al.*, 2010 or Blazy *et al.* (2009). Schmidt *et al.* (2010) developed a three-step typology for characterizing and comparing rapeseed cropping systems in France. Like ours, their typology was elaborated from two types of variables: variables related to medium-term agronomic strategies (e.g. crop succession, ploughing frequency, organic manure spreading, etc.), and variables directly related to rapeseed management practices (e.g. sowing date and density). After defining the typology, they compared the relative performances of the 13 most important clusters in terms of total, herbicide, and non-herbicide TFI. The three performances they analyzed largely corresponded to choice variables for the farmers. The strength of our approach is that the typology is based on farmers' choice variables (including pesticide use) and that the two performance indicators compared (average yield and yield robustness to abiotic perturbations) result mainly from these choice parameters.

Of course, the results presented in this paper are restricted to the sample of farms we used. The potential biases of our sample should be analyzed and, if necessary, corrected if the ambition is to develop a representative analysis of the full range of wheat cropping systems used in France. Information provided approximately every five years by governmental surveys of cropping practices could be useful in this regard (French Ministry of Agriculture, 2016). The results of our approach are also constrained by the choice of the entry variables used to define the typology. In addition, the small number of farms in each of the six regions means that any analysis at the regional level must be made cautiously, although such an analysis could potentially be relevant and instructive (for full regional results, see Appendix 5.3). The reader will note, however, that our national analysis took the geographical dimension into account by expressing both typology variables and yield performances as percent deviations from regional averages; this is in contrast to Schmidt *et al.* (2010), who used observed TFI variables without transformation. The different variables used to establish the typology necessarily influence its structure and characteristics (Blazy *et al.*, 2009). The agronomic relevance and consistency of the typology do not totally solve this problem, although they make it possible to interpret the results with some confidence.

A final methodological aspect concerns the way wheat yield performances were calculated on the basis on an estimated equation relating wheat yield variability (explained variable) to an index of abiotic perturbations (explanatory variable) (for more details, see Equation [1]). Urruty *et al.* (2016) provides a literature review within the agricultural context of the similarities and differences of the four main concepts (stability, robustness, vulnerability, and resilience) that are generally used to assess agricultural systems' ability to maintain or recover functionality in challenging environments. Following these authors, we used here the concept of robustness as it corresponds to the ability of a system and/or its components (crops, varieties, herds, animals, *etc.*) to maintain performances in the face of perturbations. Despite its simplicity and parsimony, the estimated equation (1) explains 75% of wheat yield variability, and approximately half of the estimated parameters associated with the dummy variables representing the wheat cropping systems were statistically significant.

The three-step typology defined six classes of wheat cropping systems with contrasting performances in terms of wheat yields under conditions of average abiotic perturbations. More specifically, average wheat yield performances were significantly lower on farms relying on low-intensive management practices (type M3) compared to farms employing highly intensive (type M1) or moderately intensive (type M2) practices; this was true for both simplified (type R1) and diversified (type R2) rotations. This first result is well documented (Evans and Fischer, 1999; Oerke, 2006; Spiertz, 2010) and is thus not a surprise. A second result concerning average wheat yield performances was that no significant differences were found between clusters of type M2 (moderately intensive, flexible management practices) and M1 (highly intensive , flexible management practices). Bearing in mind the limits of our analysis as described above, this second result suggests that similar yields can be obtained in average weather conditions with both highly and moderately intensive management practices provided that the latter are combined with management flexibility. This result is interesting given the presumably positive environmental impacts of M2-type vs. M1-type cropping systems. Unfortunately, our farm sample and methodology did not allow us to identify a class of wheat cropping systems conducted with highly intensive, flexible management practices. A third result, finally, deserves to be mentioned, which is that no significant differences in terms of average wheat yield performances were found from the pairwise comparison of diversified (type R2) *vs.* simplified (type R1) rotations when the other cropping system characteristics were the same (pairwise comparison of R2M1 *vs.* R1M1, R2M2 *vs.* R1M2, and

R2M3 *vs.* R1M3). This result is also interesting because of the likely positive environmental benefits of more diversified rotations (Gaudin *et al.*, 2015)

Our results concerning the relative performances of the six clusters in terms of robustness to abiotic perturbations are far less marked, yielding primarily non-significant tests. Only one pair-wise comparison of clusters was significant: the cropping systems of cluster R2M2 (diversified rotations with moderately intensive, flexible management practices) appeared less sensitive to abiotic perturbations than those of cluster R2M1 (diversified rotations with highly intensive, inflexible management practices). Interestingly, average wheat yields of these two clusters were not statistically different (Table 22). The small number of significant tests results from the high variability of robustness indicators within each cluster (Figure 29).

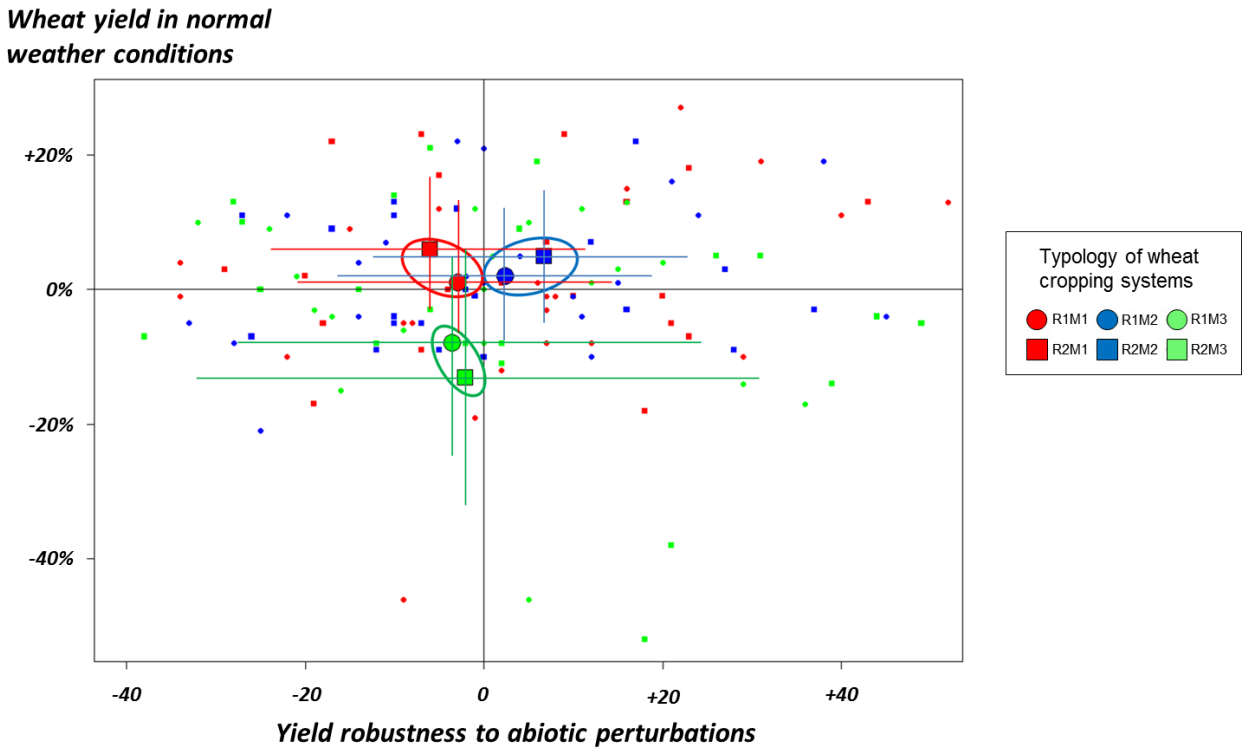


Figure 29 : Mean and standard deviation of yield performances within each of the six clusters

A complementary typology was also built, again using a three-step statistical approach but this time including among the entry variables for the second step the wheat yield robustness coefficient to abiotic perturbations. The partial typology derived from the second stage of this approach is detailed in Table 5.4.1 in Appendix 5.4. Comparison of Table 5.4.1 and Table 20 shows that the breakdown in to three clusters was preserved, with three types of management practices (M1, M2 and M3). The number of wheat cropping systems in each of the three classes changed, however, with a reduced number of farms in cluster M2 and an increased number of farms in cluster M3. It should be noted that the wheat cropping systems of type M1 (highly intensive, inflexible management practices) now appear significantly less robust, while those of type M2 (moderately intensive, flexible management practices) appear significantly more robust.

The full typology elaborated from rotation practices (step one) and management practices augmented with the robustness variable (step two) yielded six clusters, the performances of which (average wheat yields and wheat yield robustness to abiotic perturbations) are summarized in Table 5.4.2 in Appendix 5.4. From this table, we can see that the wheat cropping systems of the new R2M1 cluster (diversified rotations with highly intensive, inflexible management practices) were significantly less robust, while those of the new R2M2 cluster (diversified rotations with moderately intensive, flexible management practices) were more robust.

These results relative to wheat yield robustness to abiotic perturbations echo several other studies in which flexibility or plasticity is presented as a key driver of agricultural system robustness generally, not only for wheat cropping systems (see, for example, Hanson *et al*. 2007; Rodriguez *et al*. 2011; Sabatier *et al*. 2013). Our results also confirm a conclusion from Urruty et al. (2016, submitted1), which used the same sample of French wheat farms but a different methodology to assess wheat yield robustness in the face of changing weather conditions. Urruty et al. (2016, submitted1) placed the different wheat cropping systems in four quadrants using the regional average wheat yield in normal weather conditions and the regional average estimated coefficient of robustness to abiotic perturbations as cut-off lines to divide the quadrants. They then analyzed the main characteristics of the four quadrants on the basis of three groups of agronomic practices: management intensification, rotations, and flexibility. While several management intensification and crop rotation practices allowed for the differentiation of high vs. low yield wheat cropping systems, only some flexibility practices could be retained as distinguishing robust vs. sensitive yield patterns. This paper confirms this last result, with some nuances and precisions.

V.Conclusion

In this paper, agricultural production and climate data were used to assess the yield robustness of 145 French cropping systems producing wheat. A statistical typology of these systems was developed that enabled us to distinguish six production system classes on the basis of two types of rotations (simplified versus diversified) and three types of management practices (high-intensity, inflexible practices; moderate-intensity, flexible practices; and low-intensity, inflexible practices). An original analytical framework relating wheat yield variability to an index of abiotic perturbations was then used to assess wheat yield performances under both normal and changing weather conditions. Yield performances under average weather conditions were significantly greater in the high- and moderately intensive cropping systems compared to the extensive (low-intensity) cropping systems. By contrast, very few differences were statistically significant for wheat yield robustness to abiotic perturbations. This can partly be explained by the high variability of the robustness parameter within each cluster.

The results suggest that a variety of approaches can be used to reduce the sensitivity of wheat cropping systems to abiotic perturbations. They also suggest that flexibility is a key lever for increasing wheat yield robustness. These initial findings need to be broadened and extended by applying a similar analysis to other datasets relating to other crops, in France and in other countries, and by adding to the number of agricultural practices used to define the typology (in particular to check its robustness when new practices and especially new flexibility practices are

introduced). Our approach could also be used to analyse complementary robustness issues, for example the robustness of wheat performances in the face of changing biotic conditions.

VI. References

Anwar, M.R., O'leary, G., McNeil, D., Hossain, H., Nelson, R., 2007. Climate change impact on rainfed wheat in south-eastern Australia. Field Crops Research 104, 139-147.

Bellon, S., Lescourret, F., Calmet, J.-P., 2001. Characterisation of apple orchard management systems in a French Mediterranean Vulnerable Zone. Agronomie 21, 203-213.

Blazy, J.-M., Ozier-Lafontaine, H., Doré, T., Thomas, A., Wery, J., 2009. A methodological framework that accounts for farm diversity in the prototyping of crop management systems. Application to banana-based systems in Guadeloupe. Agricultural Systems 101, 30-41.

Brisson, N., Gate, P., Gouache, D., Charmet, G., Oury, F.-X., Huard, F., 2010. Why are wheat yields stagnating in Europe? A comprehensive data analysis for France. Field Crops Research 119, 201-212.

Brisson, N., Ruget, F., Gate, P., Lorgeou, J., Nicoullaud, B., Tayot, X., Plenet, D., Jeuffroy, M.-H., Bouthier, A., Ripoche, D., 2002. STICS: a generic model for simulating crops and their water and nitrogen balances. II. Model validation for wheat and maize. Agronomie 22, 69-92.

Challinor, A., Watson, J., Lobell, D., Howden, S., Smith, D., Chhetri, N., 2014. A meta-analysis of crop yield under climate change and adaptation. Nature Climate Change 4, 287-291.

Easson, D., White, E., Pickles, S., 1993. The effects of weather, seed rate and cultivar on lodging and yield in winter wheat. The Journal of Agricultural Science 121, 145-156.

French Ministry of Agriculture, 2016. Enquêtes sur les pratiques culturales en 2011. URL :http://www.agreste.agriculture.gouv.fr/enquetes/pratiques-culturales/grandes-cultures-prairies/

Fuhrer, J., Gregory, P.J., 2014. Climate Change Impact and Adaptation in Agricultural Systems: Soil Ecosystem Management in Sustainable Agriculture. CABI.

Gaudin, A.C.M., Tolhurst, T.N., Ker, A.P., Janovicek, K., Tortora, C., Martin, R.C., Deen, W., 2015. Increasing Crop Diversity Mitigates Weather Variations and Improves Yield Stability. PLoS ONE 10, e0113261.

Gurrutxaga, I., Muguerza, J., Arbelaitz, O., Pérez, J.M., Martín, J.I., 2011. Towards a standard methodology to evaluate internal cluster validity indices. Pattern Recognition Letters 32, 505-515.

Hanson, J.D., Liebig, M.A., Merrill, S.D., Tanaka, D.L., Krupinsky, J.M., Stott, D.E., 2007. Dynamic Cropping Systems. Agronomy Journal 99, 939-943.

Islam, M.A., Alizadeh, B.Z., van den Heuvel, E.R., Bruggeman, R., Cahn, W., de Haan, L., Kahn, R.S., Meijer, C., Myin-Germeys, I., van Os, J., 2015. A comparison of indices for identifying the number of clusters in hierarchical clustering: A study on cognition in schizophrenia patients. Communications in Statistics: Case Studies, Data Analysis and Applications 1, 98-113.

Kang, Y., Khan, S., Ma, X., 2009. Climate change impacts on crop yield, crop water productivity and food security – A review. Progress in Natural Science 19, 1665-1674.

Luo, Q., Williams, M.A., Bellotti, W., Bryan, B., 2003. Quantitative and visual assessments of climate change impacts on South Australian wheat production. Agricultural Systems 77, 173-186.

Maseda, F., Dıaz, F., Alvarez, C., 2004. Family dairy farms in Galicia (NW Spain): classification by some family and farm factors relevant to quality of life. Biosystems Engineering 87, 509-521.

Meynard, J.-M., Doré, T., Lucas, P., 2003. Agronomic approach: cropping systems and plant diseases. Comptes Rendus Biologies 326, 37-46.

Rodriguez, D., Power, B., Cox, H., Crimp, S., Meinke, H., 2011. The intrinsic plasticity of farm businesses and their resilience to change. An Australian example. Field Crops Research 124, 157-170.

Sabatier, R., Wiegand, K., Meyer, K., 2013. Production and Robustness of a Cacao Agroecosystem: Effects of Two Contrasting Types of Management Strategies. PloS one 8, e80352.

Sebillotte, M., 1990. Système de culture, un concept opératoire pour les agronomes. Les systèmes de culture, 165-196.

Schmidt, A., Guichard, L., Reau, R. (2010). Le colza est très dépendant des pesticides dans les rotations courtes sans labour. Agreste syntheses, 121(7).

Tomassen, P., Vandeplas, G., Van Zele, T., Cardell, L.-O., Arebro, J., Olze, H., Förster-Ruhrmann, U., Kowalski, M.L., Olszewska-Ziąber, A., Holtappels, G., 2016. Inflammatory endotypes of chronic rhinosinusitis based on cluster analysis of biomarkers. Journal of Allergy and Clinical Immunology.

Urruty, N., Tailliez-Lefebvre, D., Huyghe, C., 2016. Stability, robustness, vulnerability and resilience of agricultural systems. A review. Agronomy for Sustainable Development 36, 1-15.

Urruty, N., Guyomard, H., Tailliez-Lefebvre, D., Huyghe, C., 2016 (submitted1). Designing high yielding and robust wheat crops, 2- Characterization and assessment of yield robustness to abiotic perturbations. *Submitted to the European Journal of Agronomy (october 2016)*

Urruty, N., Tailliez-Lefebvre, D., Huyghe, C., 2016 (submitted2). Designing high yielding and robust wheat crops, 1- Characterization and quantification of abiotic and biotic perturbations on wheat growth and yield. *Submitted to the European Journal of Agronomy (june 2016)*

SECTION 3 : ANALYSE DE LA ROBUSTESSE DES PERFORMANCES DU BLE TENDRE FACE AUX PERTURBATIONS BIOTIQUES

Chapitre 6 : Robustesse des systèmes de culture face aux perturbations biotiques, le cas de l'utilisation des fongicides sur le blé tendre face à des niveaux contrastés de pression maladies

Ce dernier chapitre se présente sous la forme d'un article qui sera prochainement soumis à la revue internationale Crop Protection. *Dans cet article, le cadre d'évaluation de la robustesse défini dans la section précédente est appliqué au cas de la protection fongicide des parcelles de blé tendre. L'objectif était de caractériser les systèmes de culture les plus robustes face aux perturbations maladies, c'est-à-dire ceux capables de maintenir de bas niveaux d'utilisation de fongicides malgré l'augmentation du niveau de pression maladies.*

Dans un premier temps, un indicateur de perturbations biotiques a été développé à partir des rendements observés dans des réseaux d'essais variétés conduits par Semences-de-France. La différence de rendement entre les essais traités et non-traités avec des fongicides a permis d'estimer pour chaque site le niveau d'intensité des maladies cryptogamiques sur le blé tendre. Une méthode d'interpolation spatiale a ensuite permis d'estimer l'intensité du niveau de pression maladies pour l'ensemble du territoire sur la période 2011-2014. Dans un second temps, un cadre d'évaluation économétrique a été développé pour étudier la relation entre le niveau de protection fongicide mesuré à travers l'indice de fréquence de traitement (IFT) et le niveau de pression maladies mesuré à travers l'indicateur de perturbations biotiques. Ce cadre d'évaluation a été appliqué à l'échelle de chaque système de culture du réseau FERMEcophyto. Les résultats obtenus soulignent à nouveau un effet système de culture et la variabilité des performances d'un système de culture à l'autre.

Les deux approches utilisées dans les chapitres 4 et 5 ont ensuite été utilisées pour caractériser les profils agronomiques des systèmes les plus robustes versus les plus sensibles vis-à-vis des perturbations biotiques. La première approche a donc consisté à répartir les systèmes de culture dans quatre quadrants au regard de leur niveau d'utilisation de fongicides lorsque le niveau de pression maladies est moyen et de leur niveau de sensibilité face à l'indicateur de perturbations biotiques. La seconde approche a consisté à comparer les performances des six clusters de systèmes de culture définis dans le chapitre précédent en termes d'utilisation de fongicides. Les résultats soulignent des différences importantes pour expliquer le niveau d'utilisation moyen de fongicides mais peu de différences pour expliquer les différences de robustesse d'un système de culture à l'autre. Plusieurs hypothèses sont avancées pour expliquer ces résultats, notamment l'échantillon de fermes utilisées qui correspond à des exploitations ayant choisi de réduire leur utilisation de pesticides dans le cadre du plan ECOPHYTO.

Assessing the robustness of cropping systems to biotic perturbations: the case of pesticide use under changing pest conditions in French wheat cropping systems

Nicolas Urruty[a,b,], Hervé Guyomard[a], Delphine Tailliez-Lefebvre[c], Christian Huyghe[a]*

(a) INRA, CODIR Agriculture, 147 rue de l'Université, F-75338 Paris, France
(b) University of Poitiers, PRES France Centre Atlantique Université, 15 rue de l'Hôtel Dieu, 86073 Poitiers, France
(c) Agrosolutions, 81 avenue de la Grande Armée, Paris, France

I. Introduction

Facing multiple challenges, agricultural systems of the 21st century must adapt to an environment of growing uncertainty. In particular, climate change creates unprecedented challenges that threaten global food security due to its uncertain impacts on crop yields and on the distribution of crop pests (Lamichhane et al., 2014). In this context, chemical crop protection will continue to play a key role in safeguarding crop productivity against competition and losses from weeds, pests, pathogens and viruses (Oerke, 2006; Godfray et al., 2010). Nevertheless, the use of pesticides poses serious drawbacks, including the impacts on non-target organisms and, more widely, on biodiversity (Geiger et al., 2010), but also on human health (Inserm, 2013). For this reason, there is an on-going debate about pesticide use reduction in Europe and, more specifically, in France which adopted in 2008 an ambitious plan aiming at reducing pesticide use by 50 % within 10 years (Ecophyto Plan, 2008). A recent study showed however that French pesticide use has not decreased since the adoption of the environmental plan (Hossard et al., 2017). Knowledge, innovation and information gaps still exist about the drivers that influence pesticide use at farm level and its variability over time and space.

Pesticide use intensity depends on many factors, including the type of crops (Urruty *et al.*, 2016a), individual farming conditions, such as expected yields and farmer's risk aversion (Pannell, 1991), and the variability of pest populations. From one year to another, the occurrence of pests can greatly vary on a farm according to climate conditions (Coakley *et al.*, 1999), but also in function of cropping system characteristics. For example, a higher frequency of a given crop in time and space favors the development of associated pests and tends to increase the intensity of pesticide use for that crop (Rusch *et al.*, 2010; Ratnadass *et al.*, 2012).

One option for reducing agricultural pesticide use is thus to design cropping systems which are able to minimize the sensitivity of crops to pests and thus reduce the need to control them (Barzman *et al.*, 2015). Following Urruty *et al.* (2016b) who defined robustness as the ability of agricultural systems, and their components, to maintain performances in the face of perturbations, we focus here on the robustness of cropping systems to biotic perturbations. More specifically, we examine

cropping systems which are able to maintain low pesticide use in the face of changing pest pressures.

To address this question, we focus on fungicide use intensity on wheat crops in France, and its response to various intensities of fungal pressure. The aim of this paper is to identify management or rotation practices than can increase the robustness (or equivalently reduce the sensitivity) of wheat cropping systems to fungal diseases. We used pesticide and agronomic data obtained from a large network of 145 French wheat-growing farms participating in the Ecophyto plan and surveyed over the period 2011-2014. To evaluate the intensity of fungal diseases over this period and across the 145 farms, an index of fungal pressure was elaborated. The robustness of cropping systems to biotic perturbations was then studied through an analytical framework that links fungicide use intensity to this index of fungal pressure. This framework enabled us to assess how farmers have adjusted fungicide use intensity according to fungal pressure and whether this response differed from one cropping system to another.

The same methodological approaches as those developed in Urruty *et al.* (2016c) and Urruty *et al.* (2016d) were used in order to identify agricultural practices that can explain why some farms exhibit higher or, conversely, lower robustness patterns. In a first approach, we divided the different cropping systems into four quadrants on the basis of two criteria: 1) fungicide use intensity under average biotic perturbations (high *versus* low fungicide use intensity) and 2) fungicide response to fungal pressure (high *versus* low sensitivity). Wheat management and rotation practices were then compared between the four quadrants. In a second approach, we used a cropping system typology which differentiated six classes of cropping systems on the basis of two types of rotations (simplified *versus* diversified) and three types of management practices (high intensive, inflexible management practices; moderately intensive, flexible management practices; and low intensive, inflexible management practices). We studied whether these six classes of cropping systems showed differences in terms of the two criteria defined above.

II. Materials and methods

II.1. Data

Data inputs were based on a sample of 145 cropping systems corresponding to 145 farms for which pesticide use and agronomic practices were observed on a total of 2,327 wheat parcels over the period 2011 to 2014. Fungicide use intensity was assessed for each cropping system through the Treatment Frequency Index (TFI), *i.e.* the number of fungicide treatments applied per hectare over the entire wheat crop cycle (Gravesen, 2003). The dataset was provided by the major French agricultural cooperative group InVivo and its member cooperatives.

The 145 farms are distributed across six geographical zones (A to F) corresponding to six contrasting profiles of abiotic limiting factors (Urruty *et al.,* 2016e). This geographical zoning was used in this paper owing to the close relationship between climate conditions and fungal diseases pressure (see, for example, Maillard *et al.,* 2013 and the discussion section of this paper for more details).

II.2. The index of fungal pressure

Data from 186 wheat variety trials monitored by Semences-de-France[5] were used to design an index of fungal pressure (FP) over the period 2011-2014 and across the whole territory. In each site, the yield gap between diseased (no use of fungicides) and disease-free (full protection with fungicides) experimental units plots was measured. Because other influential factors are identical (same variety, same soil characteristics, same nitrogen management, etc.), the yield gap can entirely be attributed to the effects of fungal diseases on wheat yield. The index of fungal pressure was thus calculated on each site as the relative yield difference between diseased and disease-free experimental units:

$$FP_t^i = \sum_1^n \frac{1}{n} \times \frac{(yDF_t^i - yD_t^i)}{yDF_t^i} \qquad (1)$$

where FP_t^i is the index of fungal pressure of site i on year t, n is the number of experimental units in site i on year t, yDF_t^i is the yield of the disease-free unit in site i on year t, and yD_t is the yield of diseased units in site i on year t.

Each variety has its own disease resistance profile (e.g. high resistance to septoria, low resistance to brown rust, etc.), which can evolve over time due to the development of resistance by fungus (Mundt *et al.*, 2002). For assessing the FP index in a homogeneous way across the whole territory, only wheat trials of a single variety were used. The Apache variety was chosen due to the large number of trials carried out between 2011 and 2014 and because its resistance profile little changed over the period 2011-2014 (Lefebvre S., personal communication, 2016). Apache trials include 17 trials in 2011, 56 in 2012, 48 in 2013 and 65 in 2014 (Table 24).

Table 24 : Number of Apache variety trials derived from the Semences-de-France network over the period 2011-2014

French regions	2011	2012	2013	2014	Total
Alsace	1				1
Aquitaine		2			2
Auvergne			1	1	2
Basse-Normandie	2	1	1	3	7
Bourgogne		1	1	1	3
Bretagne	1	2	3	2	8
Centre	1	10	11	9	31
Champagne-Ardenne	3	3	3	3	12
Franche-Comté		2			2
Haute-Normandie		2	1	4	7
Ile-de-France	2	2	4	7	15
Languedoc-Roussillon	1	1	1	4	7

[5] Semences de Frances is a commercial department of InVivo cooperative group specialized in cereal seeds marketing.

French regions	2011	2012	2013	2014	Total
Midi-Pyrénées	2	6	5	6	19
Nord-Pas-de-Calais		2	1	2	5
Pays-de-la-Loire		3	2	3	8
Picardie	1	13	7	8	29
Poitou-Charentes	2	2	3	6	13
Rhône-Alpes	1	4	4	6	15
Total	**17**	**56**	**48**	**65**	**186**

Even if the 186 trials of Apache variety were distributed relatively well across the whole territory, some farms were located in areas where no trial had been conducted by Semences-de-France. In order to estimate the FP index for all the 145 farms, a spatial interpolation method was used (Lloyd, 2005). This approach makes it possible to predict the value of any unknown point according to observations surrounding it (Figure 30).

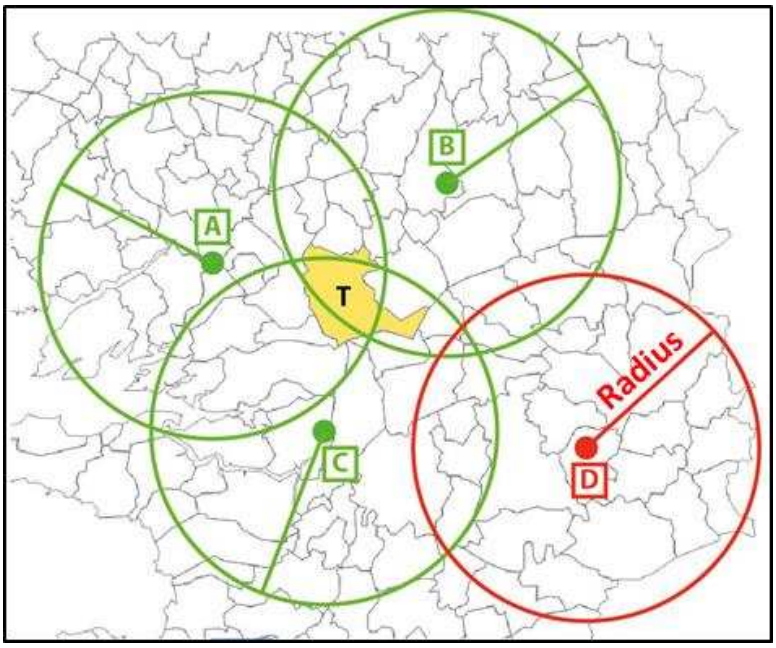


Figure 30 : Description of the spatial interpolation method: the value of territory T is estimated from known values of sites A, B and C (Cartes&Données, 2015)

To implement the spatial interpolation method, a 10 x 10 km grid was applied to cover the whole country. The value of the FP index in each grid cell was then estimated as the weighted average of FP indexes calculated in the trial locations surrounding it (Lu and Wong, 2008). The more a grid cell was far from a trial location, the less it was influenced by the value of the trial. A radius of 200 kilometers was used to cover the whole territory.

The accuracy of interpolation results was assessed using a leave-one-out cross-validation (LOOCV). To that end, each location of the variety trials was taken out one-by-one, and the value of the FP index was predicted on the basis of the remaining values. The global quality of interpolation results was then assessed through linear regression of actual FP index values over predicted FP index values (Steinbuch *et al.*, 2016).

II.3. Assessing the robustness of cropping systems to fungal pressure

The robustness of cropping systems in the face of changing biotic perturbations was analyzed through a linear regression model that links fungicide use intensity to the index of fungal pressure. The index of fungal pressure was differentiated at the scale of the cropping system using dummy variables to test whether the estimated parameters associated with these dummy variables were significantly different from zero and to test the possibility of a ''cropping system effect''. The estimated model was:

$$TFI_{ikt} = [a_k.D(k)] + [b_k.D(k)].FP_{it} \quad (2)$$

where TFI_{ikt} is the fungicide treatment frequency index of plot i in cropping system k on year t, $D(k)$ are dummy variables of cropping systems k, and FP_{it} is the fungal pressure intensity index of plot i on year t (t ϵ [2011, ..., 2014]); a_k and b_k are parameters to be estimated.

Parameters a_k estimate the average fungicide use intensity of cropping system k when fungal pressure is null, and each parameter b_k captures the sensitivity of cropping system k to fungal pressure. If the estimated parameters b_k were significantly different from a common constant, the sensitivity of wheat cropping systems to fungal pressure varies according to the cropping system that is used. The constancy of the b_k parameters was evaluated using a Fischer test.

II.4. Characterizing agronomic drivers of robustness of cropping systems to fungal pressure

Regression results of Equation (2) were used to differentiate the 145 cropping systems in terms of robustness to fungal pressure. Two criteria were used. The first was the fungicide use intensity under average (or moderate) fungal pressure (hereafter "average TFI"). Average TFIs were quantified using estimated parameters of Equation (2) and the average value of the FP index for each cropping system over the four-year period 2011-2014. The second criterion was the sensitivity of cropping systems to fungal pressure (hereafter "TFI sensitivity") and was provided by the estimated parameters b_k in Equation (2).

On the basis of these two criteria, two approaches were used to characterize robust *versus* sensitive cropping systems in the face of biotic perturbations.

II.4.1. Four patterns of fungicide use

In this first approach, the two criteria defined above were used to discriminate four patterns of fungicide use intensity. In order to take into account regional differences in terms of cropping context and biotic conditions, the four patterns were defined at the level of each geographical zone A to F. Median values of the two criteria defined above were used as cut-offs in each geographical (Table 25). Finally, the four quadrants correspond to cropping systems with: high TFI, low sensitivity (Q1); high TFI, high sensitivity (Q2); low TFI, low sensitivity (Q3); and low TFI, high sensitivity (Q4).

Table 25 : Four patterns of fungicide use robustness

Classification criteria		Second criterion: TFI sensitivity to fungal pressure (estimated b_k parameter)	
		Below the median of the criterion	**Above the median of the criterion**
First criterion: Fungicide use intensity (TFI) under average fungal pressure	**Above the median of the criterion**	(Q1) High TFI & Low sensitivity	(Q2) High TFI & High sensitivity
	Below the median of the criterion	(Q3) Low TFI & Low sensitivity	(Q4) Low TFI & High sensitivity

In the same way we used the four-quadrant approach for analyzing yield robustness to abiotic perturbations (Urruty *et al.*, 2016d), the agronomic characteristics of the four groups of cropping systems defined in Table 25 were compared for analyzing fungicide TFI robustness to fungal pressure variability. The 23 agronomic characteristics were divided into three groups with ten variables describing wheat intensification management practices, six variables describing crop rotation practices and seven variables describing flexibility practices (Table 26).

Table 26 : Characterization of wheat cropping systems using three groups of agronomic practices

	Practices	Description
Management intensification practices (Group 1)	Total nitrogen rate	Average amount of nitrogen fertilizers (mineral and organic) per hectare (kg/ha)
	Number of nitrogen applications	Average number of nitrogen applications per hectare on the entire wheat crop cycle
	Fungicide use intensity	Average number of fungicide treatments per hectare on the entire wheat crop cycle
	Total pesticide use intensity	Average number of pesticide treatments (fungicides, herbicides, insecticides and others) per hectare on the entire wheat crop cycle
	Sowing date	Average sowing date for wheat
	Sowing density	Average sowing density for wheat per hectare (kg/ha)
	Variety earliness at joint stage	Average earliness score at joint stage of wheat varieties used over the entire wheat crop cycle
	Variety earliness at heading stage	Average earliness score at heading stage of wheat varieties used over the entire wheat crop cycle
	Variety disease resistance	Average disease resistance score of wheat varieties used over the entire wheat crop cycle
	Soil tillage intensity	Average number of soil tillage operations during the entire wheat crop cycle
Rotation practices (Group 2)	Rotation diversity	Average number of different species in the rotation
	Frequency of summer crops	Percentage of wheat preceded by summer crops (maize, sunflower, potato...)
	Frequency of legume crops	Percentage of wheat preceded by legumes (alfalfa, pea, soybean...)
	Frequency of cereals	Percentage of cereals, including wheat, in the rotation
	Frequency of wheat	Percentage of wheat in the rotation
	Frequency of temporary meadow	Frequency of temporary meadow in the rotation

	Practices	Description
Flexibility practices (Group 3)	Flexibility of total nitrogen rate	Empirical standard deviation of total nitrogen rate between the different wheat plots
	Flexibility of total pesticide use intensity	Empirical standard deviation of total pesticide use intensity between the different wheat plots
	Flexibility of sowing date	Empirical standard deviation of sowing date between the different wheat plots
	Flexibility of sowing density	Empirical standard deviation of sowing density between the different wheat plots
	Flexibility of variety earliness at joint stage	Empirical standard deviation of variety earliness scores at joint stage between the different wheat plots
	Flexibility of variety earliness at heading stage	Empirical standard deviation of variety earliness scores at heading stage between the different wheat plots
	Flexibility of variety disease resistance	Empirical standard deviation of variety disease resistance scores between the different wheat plots

For the variables describing wheat intensification management practices and crop rotation practices, the values were calculated for each cropping system in reference to its respective regional average. Variables corresponding to flexibility practices were not normalized since they were calculated from variables already normalized. Comparisons were based on Wilcoxon signed-rank tests.

II.4.2. Six classes of wheat cropping systems

The typology of cropping systems defined in Urruty *et al.* (2016d) was also used to assess differences in terms of fungicide use. The six classes of cropping systems were defined as follows: simplified rotation, high-intensive, low-flexibility management practices (R1M1); diversified rotation, high-intensive, low-flexibility management practices (R2M1); simplified rotation, moderate-intensive, high-flexibility management practices (R1M2); diversified rotation, moderate-intensive, high-flexibility practices (R2M2); simplified rotation, low-intensive, low-flexibility management practices (R1M3); and diversified rotation, low-intensive, low-flexibility management practices (R2M3).

This typology was used to analyze if the robustness of cropping systems to fungal pressure varies from one class of cropping systems to another. Student's tests and Wilcoxon signed-rank tests were used to assess differences between respectively one cluster and standardized regional means, and two clusters at a time.

III. Results

III.1. The fungal pressure index

The results of the leave-one-out cross-validation (LOOCV) of the FP index are shown in Figure 31. Over the whole period, a strong positive correlation between actual and predicted values of FP index through LOOCV was measured (the coefficient of correlation is equal to 0.69 with p-value < 0.01). However, some differences were observed from one year to another. In 2011, for example, the limited number of variety trials reduces the quality of LOOCV results. Fortunately, it was a low pressure year in the whole country and deviations between actual and predicted values of FP index are limited. In 2014, some important differences were observed between actual and predicted values of FP index due to contrasting values in neighboring trial locations. However, these situations were seldom and did not counterbalance the good overall estimation of FP index across space.

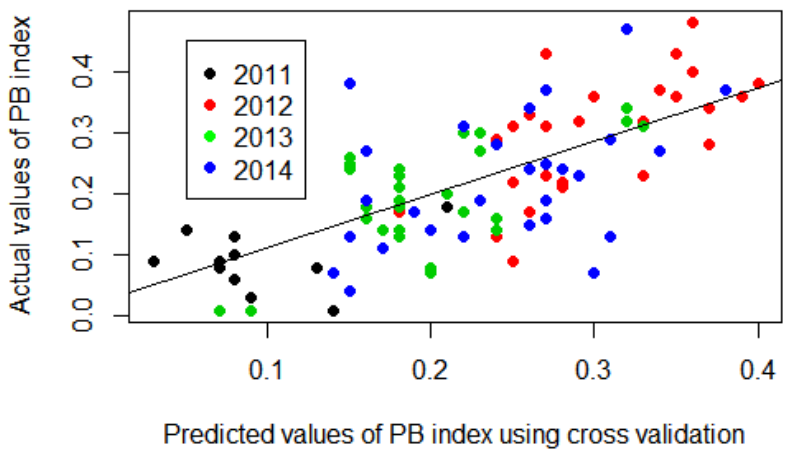


Figure 31 : Regression of cross validation results on FP index values over the 186 trial locations and over the period 2011-2014

Spatial and temporal variability of FP index over the period 2011-2014 are shown in Figure 32. Over that period, the 145 farms were exposed to contrasting intensities of fungal pressure, ranging from 8 % of yield losses in average in 2011 to 30 % in 2012. In 2013 and 2014, average results of FP index over the 145 farms were similar: 21 % and 20 % respectively. The low intensity of FP index in 2011 can be explained by low rainfalls during spring. Only farms located in extreme north-west and south-east of France were exposed to moderate fungal pressure (especially yellow rust and powdery mildew). In, 2012, 2013 and 2014, farms were exposed to higher intensities of fungal disease due to wetter conditions. The context of 2014 was marked by a strong outbreak of yellow rust, even in areas which were not affected by it so far.

Over the four-year period, the spatial distribution of FP index over the six wheat-producing environments (zones A to F) was not very contrasting. The average intensity of fungal pressure ranges from 0.17 in zones C and F to 0.25 in zone E. The latter corresponds to farms located in northwestern France and exposed to rainy weather conditions which tend to favor fungal diseases, such as Septoria blotch or yellow rust (Chakraborty and Newton, 2011). In the remaining zones A, B and D, the average intensities are close: 0.20, 0.23 and 0.19 respectively.

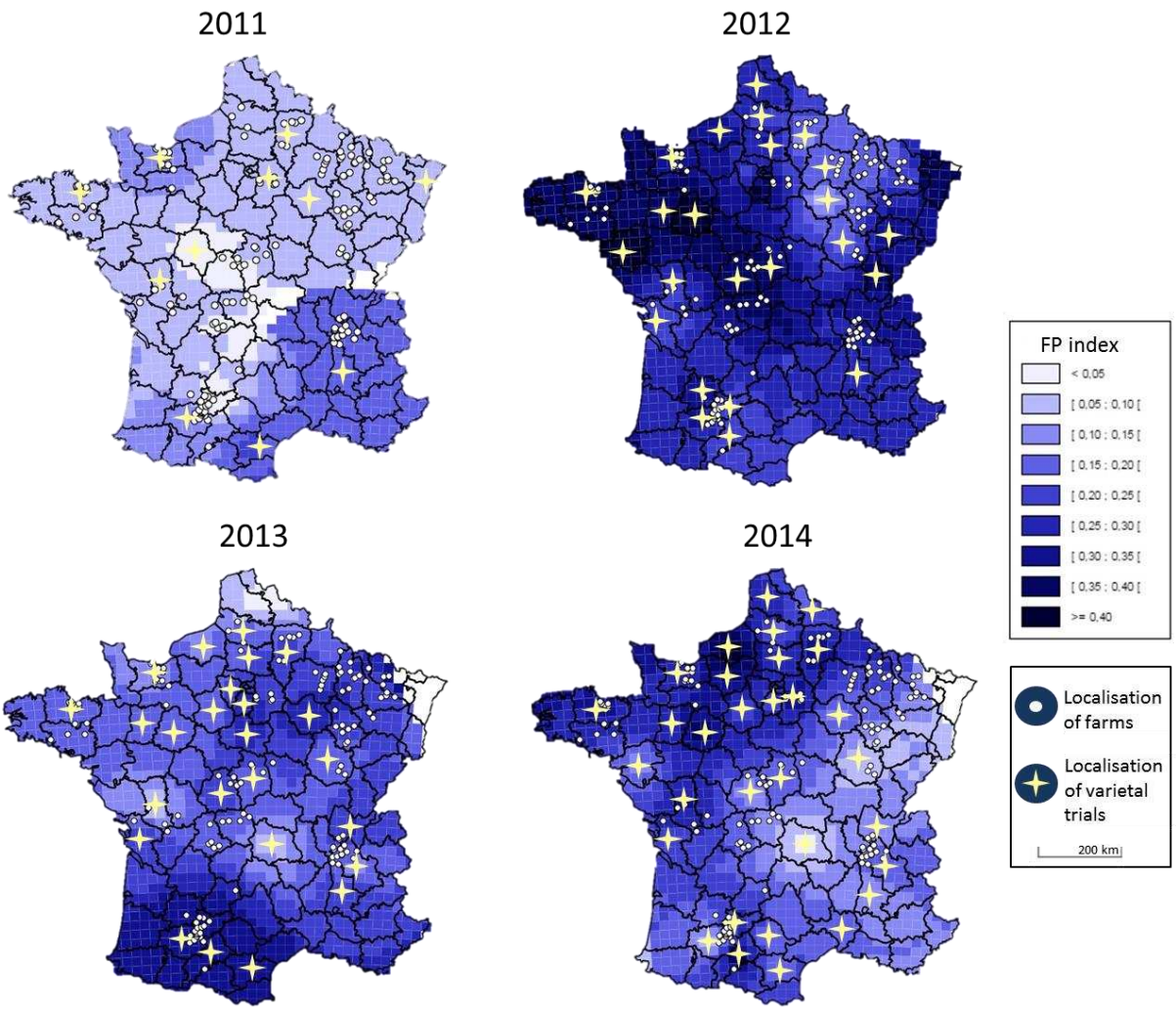


Figure 32 : Spatial distribution of FP index after geographical interpolation over the period 2011-2014

III.2. Assessment of robustness to fungal pressure

III.2.1. Econometric results

Equation (2) was first estimated for the 145 cropping systems of the database. We decided to discard 25 observations corresponding to "extreme" cropping systems for which the estimated parameters a_k or b_k were 1.5 times lower than the bottom quartile or 1.5 times upper than the top quartile. We considered that such extreme values did not fit in expected ranges of parameters. Equation (1) was thus finally estimated for 120 cropping systems. Regression results show that the model fits the data relatively well as it explains 64 % of the TFI variability as shown by the adjusted R^2 criterion. Many estimated parameters a_k and b_k were statistically different from zero, 30 % (respectively 22 %) for the parameters a_k and 45 % (respectively 33 %) for the parameters b_k at the 10 % level of significance (respectively 5 % level of significance). In addition, the test of constancy of the parameters b_k is not accepted at the 0.1 % level of significance, showing that one can econometrically identify a ''cropping system effect'' (for full statistical results, see Appendix 6.1).

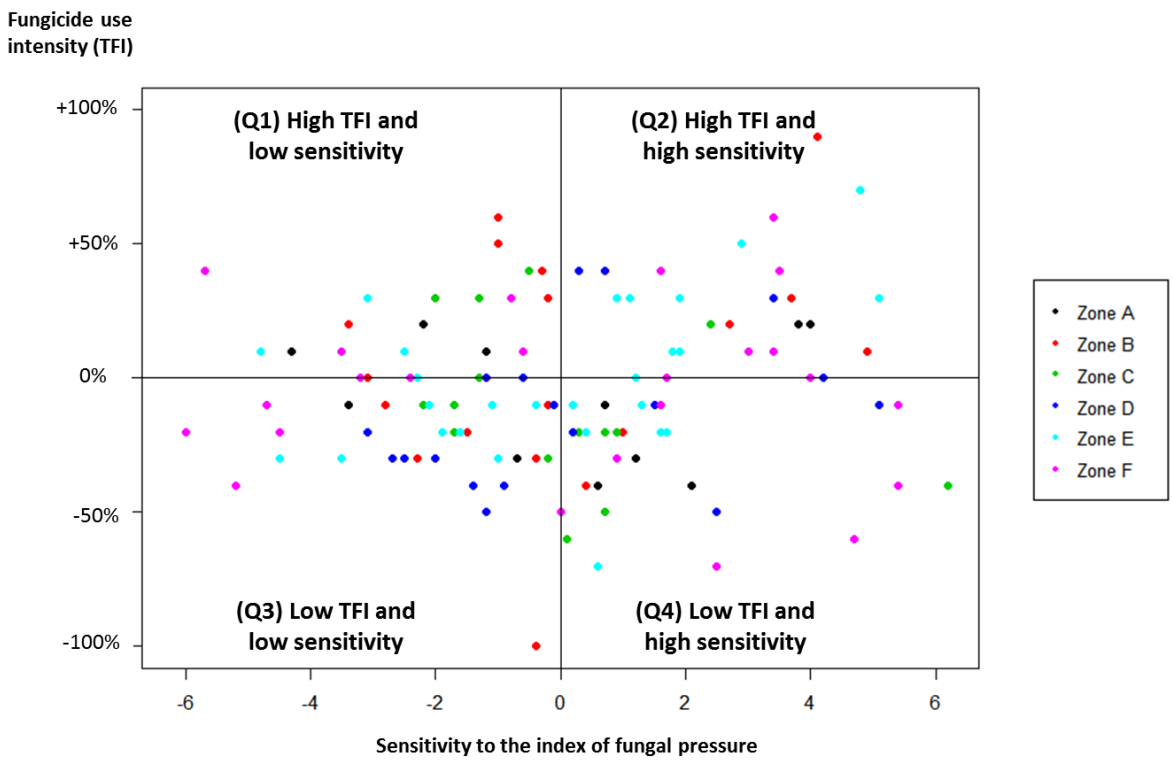
III.2.2. *Four patterns of fungicide use*

Fungicide performances of the 120 cropping systems distributed into four quadrants are presented in Table 27. Figure 33 depicts their positioning on a two-dimensional plane. In Table 28 and 29, average values of agricultural practices used in each quadrant and results of Wilcoxon signed-rank tests are presented.

Table 27 : Fungicide performances of the four patterns

Quadrant	n	Average TFI	TFI sensitivity to FP index
(Q1) High TFI and low sensitivity	25	+19% (± 30%)	- 2.2 (± 1.5)
(Q2) High TFI and high sensitivity	34	+22% (± 23%)	+ 2.4 (± 1.7)
(Q3) Low TFI and low sensitivity	35	-29% (± 22%)	- 2.1 (± 1.5)
(Q4) Low TFI and high sensitivity	26	-33% (± 18%)	+ 1.7 (± 1.7)

Note: n is the number of cropping systems per quadrant, values shown are the average percent difference with respect to regionalized averages (empirical standard deviation shown in brackets).



Note: For average TFI (y axis), values are expressed in terms of relative difference with respect to the mean of the geographical zone A to F in which the cropping system is located. For sensitivity TFI (x axis), values are absolute differences

Figure 33 : The 120 cropping systems distributed across four patterns of fungicide performances

Table 28 : Average relative values of agronomic practices in the four quadrants (values in brackets are empirical standard deviations calculated for each quadrant)

	Agricultural practices	High TFI and Low Sensitivity (Q1)	High TFI and High Sensitivity (Q2)	Low TFI and Low Sensitivity (Q3)	Low TFI and High Sensitivity (Q4)
Intensification management practices (Group 1)	Total nitrogen rate	+9% (± 15%)	+4% (± 13%)	-9% (± 22%)	-8% (± 18%)
	Number of N applications	+4% (± 18%)	+6% (± 18%)	-7% (± 23%)	-2% (± 19%)
	Fungicide use intensity	+16% (± 25%)	+19% (± 26%)	-30% (± 22%)	-25% (± 22%)
	Total pesticide use intensity	+13% (± 25%)	+11% (± 24%)	-17% (± 28%)	-14% (± 30%)
	Sowing date	0.3 (± 6.0)	1.5 (± 9.2)	- 0.2 (± 9.5)	0.5 (± 6.2)
	Sowing density	0% (± 17%)	-2% (± 10%)	+3% (± 14%)	+2% (± 16%)
	Variety earliness (joint stage)	-9% (±23%)	+3% (± 21%)	+6% (± 19%)	+1% (± 23%)
	Variety earliness (heading stage)	0% (±6%)	-1% (± 7%)	+3% (± 5%)	-1% (± 6%)
	Variety disease resistance	0% (±15%)	0% (± 17%)	0% (± 19%)	+1% (± 24%)
	Soil tillage intensity	+6% (± 42%)	+23% (± 67%)	-22% (± 59%)	-15% (± 50%)
Rotation practices (Group 2)	Rotation diversity	+6% (± 34%)	+6% (± 32%)	-9% (± 29%)	-10% (± 28%)
	Frequency of summer crops	+1% (±25%)	-4% (± 25%)	+1% (± 20%)	+1% (± 30%)
	Frequency of legume crops	+6% (±48%)	-2% (± 25%)	-2% (± 15%)	+2% (± 45%)
	Frequency of wheat	-1% (±10%)	-1% (± 14%)	+1% (± 8%)	+1% (± 13%)
	Frequency of cereals	-2% (± 12%)	0% (± 12%)	+4% (± 8%)	+2% (± 12%)
	Frequency of grassland	+10% (±60%)	-4% (± 19%)	0% (± 9%)	+55% (± 214%)
Flexibility practices (Group 3)	Flexibility of total nitrogen rate	10.2 (± 9.6)	8.8 (± 8.2)	8.7 (± 8.4)	10.4 (± 6.5)
	Flexibility of pesticide use intensity	0.41 (± 0.28)	0.48 (± 0.34)	0.33 (± 0.25)	0.40 (± 0.26)
	Flexibility of sowing date	4.8 (± 4.5)	4.9 (± 5.4)	4.0 (± 4.4)	3.1 (± 3.4)
	Flexibility of sowing density	3.2 (± 5.1)	4.1 (± 7.8)	4.4 (± 9.1)	2.0 (± 4.3)
	Flexibility of variety earliness (joint stage)	0.42 (± 0.37)	0.40 (± 0.32)	0.32 (± 0.29)	0.30 (± 0.33)
	Flexibility of variety earliness (heading stage)	0.17 (± 0.18)	0.19 (± 0.17)	0.18 (± 0.15)	0.17 (± 0.18)
	Flexibility of variety disease resistance	0.60 (± 0.47)	0.76 (± 0.60)	0.69 (± 0.54)	0.64 (± 0.50)

Table 29 : Results of Wilcoxon signed-rank tests used to compare agricultural practices between cropping systems distributed in four quadrants (*** significant at P<0.01, ** significant at P<0.05, * significant at P<0.10, and NS for not significant)

	Agricultural practices	High TFI (Q1 and Q2) vs Low TFI (Q3 and Q4)	High Sensitivity (Q2 and Q4) vs Low Sensitivity (Q1 and Q3)	High TFI and Low Sensitivity (Q1) vs High TFI and High Sensitivity (Q2)	Low TFI and Low Sensitivity (Q3) vs Low TFI and High Sensitivity (Q4)
Intensification management practices (Group 1)	Total nitrogen rate	*** (H > L)	*NS*	*NS*	*NS*
	Number of N applications	** (H > L)	*NS*	*NS*	*NS*
	Total pesticide use intensity	*** (H > L)	*NS*	*NS*	*NS*
	Sowing date	*NS*	*NS*	*NS*	*NS*
	Sowing density	*NS*	*NS*	*NS*	*NS*
	Variety earliness (joint stage)	** (H < L)*	*NS*	*NS*	*NS*
	Variety earliness (heading stage)	** (H < L)*	*** (HS < LS)*	*NS*	*** (Q3 > Q4)*
	Variety disease resistance	*NS*	*NS*	*NS*	*NS*
	Soil tillage intensity	*** (H > L)	*NS*	*NS*	*NS*
Rotation practices (Group 2)	Rotation diversity	*NS*	*NS*	*NS*	*NS*
	Frequency of summer crops	*NS*	*NS*	*NS*	*NS*
	Frequency of legume crops	*NS*	*NS*	*NS*	*NS*
	Frequency of wheat	*NS*	*NS*	*NS*	*NS*
	Frequency of cereals	* (H < L)	*NS*	*NS*	*NS*
	Frequency of grassland	*NS*	*NS*	*NS*	*NS*
Flexibility practices (Group 3)	Flexibility of total nitrogen rate	*NS*	*NS*	*NS*	*NS*
	Flexibility of pesticide use intensity	*NS*	*NS*	*NS*	*NS*
	Flexibility of sowing date	*NS*	*NS*	*NS*	*NS*
	Flexibility of sowing density	*NS*	*NS*	*NS*	*NS*
	Flexibility of variety earliness (joint stage)	*NS*	*NS*	*NS*	*NS*
	Flexibility of variety earliness (heading stage)	*NS*	*NS*	*NS*	*NS*
	Flexibility of variety disease resistance	*NS*	*NS*	*NS*	*NS*

Note: we use “H” for High TFI, “L” for Low TFI, “HS” for High Sensitivity and “LS” for Low Sensitivity cropping systems.

The first test in Table 29 compares cropping systems with high TFI under average fungal pressure and cropping systems with low TFI under average fungal pressure, independently of their sensitivity to fungal pressure (Q1 and Q2 versus Q3 and Q4). Average TFIs were 21 % greater in Q1 and Q2 (high TFI) and 30 % lower in Q3 and Q4 (low TFI) with respect to their respective average value in the geographical zone where the cropping systems are located. Several agronomic practices were statistically different between the two groups. Among intensification management practices, the total nitrogen rate, the number of nitrogen applications, the total pesticide TFI, the lateness of wheat varieties and the soil tillage frequency were significantly higher in Q1 and Q2 than in Q3 and Q4. Among rotation practices, only the frequency of cereals in crop rotations was significantly lower in Q1 and Q2 than in Q3 and Q4. No significant differences were observed among the flexibility practices.

The second test compares the robust and sensitive cropping systems under average fungal pressure (Q1 and Q3 *versus* Q2 and Q4), independently of their fungicide use intensity. Only one agronomic practice was found to be statistically significant, namely the wheat variety earliness at heading stage (higher in Q1 and Q3 than in Q2 and Q4).

Quadrants Q1 and Q2 allowed us to compare robust *versus* sensitive systems with high TFI under average fungal pressure. No significant difference was observed among the 23 agricultural practices tested. Even if differences were not significant from a statistical point of view, cropping systems in Q1 (high TFI, low sensitivity) relied more on diversified crop rotations than their counterparts in Q2 (high TFI, high sensitivity). Between quadrants Q3 (low TFI, low sensitivity) and Q4 (low TFI, high sensitivity), only one agricultural practice was significantly different, that is the wheat variety earliness at heading stage which was significantly higher in Q3 than in Q4.

III.2.3. Six classes of wheat cropping systems

Results are presented in Table 30. In column 2, the means of average TFI calculated in each cluster are compared to equivalent TFI calculated over the whole sample of 120 wheat cropping systems. The remaining columns show the pair-wise comparison of the means among the six clusters.

From the column 2 of Table 30, it can be noticed that average TFI in the two clusters characterizing extensive wheat cropping systems, be they conducted with simplified or diversified rotations (clusters R1M3 and R2M3), were significantly lower than regionalized average TFIs calculated over the sample of the 120 cropping systems. This is also the case for the cropping systems belonging to cluster R2M2, corresponding to moderately intensive management practices with diversified rotations. In contrast, average TFI in cluster R2M1 (diversified rotations, highly intensive management practices) is significantly higher than the mean calculated over the sample of the 120 farms.

Table 30 : TFI under average fungal pressure and pair-wise comparisons among the six clusters

	Mean TFI	*vs* R1M1	*vs* R2M1	*vs* R1M2	*vs* R2M2	*vs* R1M3	*vs* R2M3
R1M1 (n= 18)	+1 % (± 28%) NS						
R2M1 (n= 20)	**+17 % (± 43%) *****	NS					
R1M2 (n= 29)	+1 % (± 34%) NS	NS	NS				
R2M2 (n= 24)	**-8 % (± 28%) ***	NS	**R2M2<R2M1 (**)**	NS			
R1M3 (n= 16)	**-20 % (± 21%) *****	**R1M3<R1M1 (**)**	**R1M3<R2M1 (***)**	**R1M3<R1M2 (**)**	NS		
R2M3 (n= 13)	**-32 % (± 38%) *****	**R2M3<R1M1 (**)**	**R2M3<R2M1 (***)**	**R2M3<R1M2 (**)**	**R2M3<R2M2 (*)**	NS	

Note 1: Fungicide TFI in column 2 are expressed in reference to average fungicide TFI (percent deviation) in the region where the cropping systems are located; Figures in brackets correspond to the empirical standard deviation of the mean in each cluster; Student's t-test of the equality to zero of the mean: *** significant at P<0.01, ** significant at P<0.05, * significant at P<0.10, NS for not significant.

Note 2: RiMj < RkMl means that average fungicide TFIs in cluster RiMj are significantly lower that their equivalents in cluster RkMl with a probability P<0.01 (***), P<0.05 (**) and P P<0.10 (*), NS for not significant.

Table 31 : TFI sensitivity to fungal pressure and pair-wise comparisons among the different clusters

	Mean TFI sensitivity	*vs* R1M1	*vs* R2M1	*vs* R1M2	*vs* R2M2	*vs* R1M3	*vs* R2M3
R1M1 (n= 18)	- 0.17 (± 2.6) *NS*						
R2M1 (n= 20)	+0.30 (± 2.6) *NS*	NS					
R1M2 (n= 29)	**+ 0.71 (± 2.8) ***	*NS*	*NS*				
R2M2 (n= 24)	**-0.68 (± 2.5) ***	*NS*	*NS*	**R2M2 < R1M2 (*)**			
R1M3 (n= 16)	**-1.05 (± 2.2) ****	*NS*	*NS*	**R1M3 < R1M2 (*)**	*NS*		
R2M3 (n= 13)	+0.75 (± 2.6) *NS*	*NS*	*NS*	*NS*	*NS*	*NS*	

Note 1: Sensitivity "coefficients" of each cluster in column 2 are expressed as the absolute difference between the associated estimated parameter b_k and the average of the estimated parameters b_k for all cropping systems of the relevant zone; Figures in brackets correspond to the empirical standard deviation of the mean in each cluster; Student's t-test of the equality to zero of the mean: *** significant at P<0.01, ** significant at P<0.05, * significant at P<0.10, NS for not significant.

Note 2: RiMj < RkMl means that TFI sensitivity in cluster RiMj is significantly lower that its equivalent in cluster RkMl with a probability P<0.01 (***), P<0.05 (**) and P P<0.10 (*), NS for not significant.

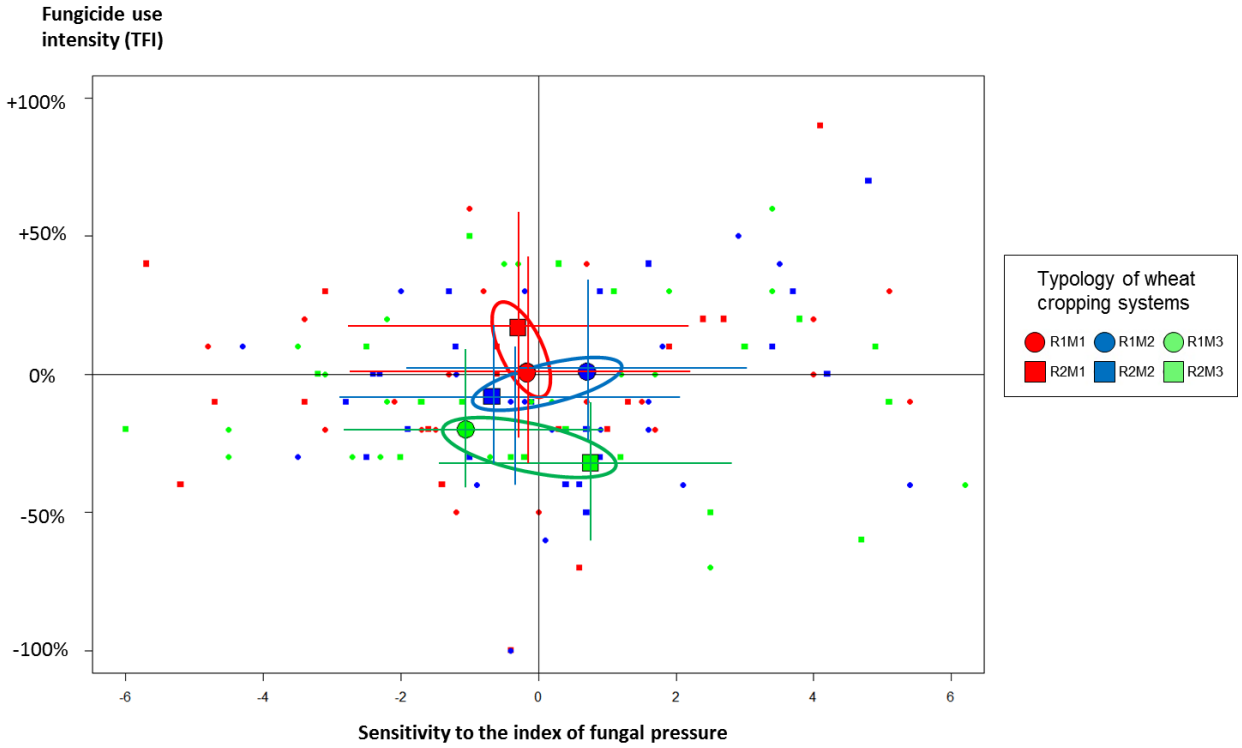
The pair-wise comparisons of TFI means in the six clusters (columns 3 to 8 in Table 30) confirm the results of previous sub-section. Notably, they show that average TFIs in cropping systems characterized by extensive management practices (clusters R1M3 and R2M3) were significantly lower than all other clusters, with the exception of cluster R2M2 for which the difference with R1M3 was not significant. More surprisingly, no significant differences were found from the pair-wise comparisons of clusters R1M1 and R2M1, clusters R1M2 and R2M2, as well as clusters R1M3 and R2M3. In other words, no impact of rotation practices on average TFI could be identified, be the crops managed more or less intensively.

We proceeded in the same way to analyse to what extent the sensitivity to FP index differs among the six clusters. Results are presented in Table 31, with regionalized means of estimated parameters b_k presented in column 2 and results of pair-wise comparisons between the different clusters presented in the following columns.

The analysis of TFI sensitivity to fungal pressure showed that few statistical tests were significant. This small number of significant tests can be explained by the high variability of sensitivity parameters in each cluster (Figure 34). Three statistical tests only were significant. The first two correspond to cropping systems with moderately intensive management practices used in a flexible way (clusters of type M2). On one hand, TFI sensitivity in cluster R1M2 characterizing cropping systems with simplified rotations is significantly higher than regionalized means calculated over the sample of the 120 farms. On the other hand, TFI sensitivity is significantly lower than regionalized means in cluster R2M2 corresponding to more diversified crop rotations. More interestingly, the pairwise comparison between these two clusters confirms that TFI sensitivity is significantly higher in cluster R1M2 than in cluster R2M2. However, the positive impact of rotation diversity on TFI robustness must be taken with great caution given the fact that opposite results were found in cropping systems corresponding to low intensive management practices (clusters of type M3). Among the latter, the cropping systems corresponding to the more diversified rotations (cluster R2M3) showed significantly higher TFI sensitivity than regionalized means and, even if the difference is not statistically significant, than cropping systems characterized by more simplified rotations (cluster R1M3).

IV. Discussion

In this paper, an original framework was applied on a large network of wheat cropping systems in order to assess fungicide use intensity under average and changing intensities of fungal pressure. The approach was the same as the one we used in Urruty *et al.* (2016c) and Urruty *et al.* (2016d) for assessing wheat yield robustness to abiotic perturbations. As a first step, an index of fungal pressure (FP index) was designed to describe the exposure level of wheat to fungal diseases over the period 2011-2014. In a second step, we assessed the relationship between inter-annual changes of fungicide use intensity (measured by the fungicide TFI) and the FP index. The sensitivity of farmers' fungicide use to fungal pressure was assessed through a linear regression model that took into account the cropping system through dummy variables. The ultimate goal of this approach was to evaluate whether the 145 farmers of the network have different behaviors in the face of changing intensities of fungal diseases and, if so, what kind of agricultural practices could improve the robustness of wheat cropping systems to changing pest conditions.



Note: For average TFI (y axis), values are expressed in terms of relative difference with respect to the mean of the geographical zone A to F which the cropping system belongs. For sensitivity TFI (x axis), values are absolute differences.

Figure 34 : Mean and standard deviation of fungicide performances within each of the six clusters

IV.1. The fungal pressure index

In the first part of the paper, an index of fungal pressure (FP index) was designed in order to assess the spatial and temporal variability of fungal diseases over the period 2011-2014. This approach, based on the comparison between diseased and disease-free experimental units, has been largely used in the literature for assessing yield losses caused by fungal diseases (see, for example, Bretag *et al.*, 1995 ; Afzal *et al.*, 2007). As for the index of abiotic perturbations (Urruty *et al.*, 2016e), the FP index summarizes the combined impacts of the various diseases that affect wheat yield. As septoria does not impact wheat yield in the same manner as brown or yellow rust (Savary *et al.*, 2015), for example, using yield loss is a convenient way for aggregating the impacts of different fungal diseases regardless of their biological mechanisms.

In the design of the FP index, only the Apache variety trials were used. This choice is obviously limiting as our FP index is, by construction, dependent on Apache characteristics, particularly on its resistance profile which is characterized by a good resistance to yellow rust. For the year 2014, which exhibited a strong pressure of yellow rust, it is likely that the intensity of fungal pressure measured by our FP index has been underestimated. It will be interesting to assess the bias linked to the use of the only Apache variety by defining the FP index on the basis of the different wheat varieties used in our sample of farms, notably because varieties present different disease resistance profiles. Information required for constructing this more complete FP index was not available in our database.

A spatial interpolation method (Oliver and Webster, 1990; Hartkamp *et al.*, 1999) was used for estimating the FP index in areas where no variety trials were reported. This methodological choice was based on the assumption that fungal pressure at local scale is driven by meteorological conditions that can be interpolated at larger scales. Nevertheless, this approach does not take into account other factors that might influence fungal pressure locally, such as microclimate and the density of wheat in the local area (Colbach *et al.*, 1997).

The calculation of our FP index shows that the estimated levels of fungal pressure vary considerably from one year to another and one region to another. As stated previously by numerous authors (Luck *et al.*, 2011; Launay *et al.*, 2014), the intensity of fungal pressure was highly related to weather conditions, notably to rainy conditions. To emphasize this point, Figure 35 depicts the negative correlation (coefficient of correlation is equal to -0.69, p-value < 0.01) between the FP and ABIO indexes (Urruty *et al.*, 2016e) calculated over the period 2011-2014 in the sample of 120 farms[6]. Figure 35 also emphasizes the specific situation of each year 2011 to 2014. The rainy year 2012 was characterized by low exposure to abiotic perturbations (low ABIO index) but a high exposure to fungal diseases (high FP index). By contrast, the dry year 2011 was characterized by high exposure to abiotic perturbations (high ABIO index) but low exposure to fungal diseases (low FP index). The years 2013 and 2014 were in an intermediate situation with average ABIO and FB indexes, the variability of the ABIO index being higher than the variability of the FP index.

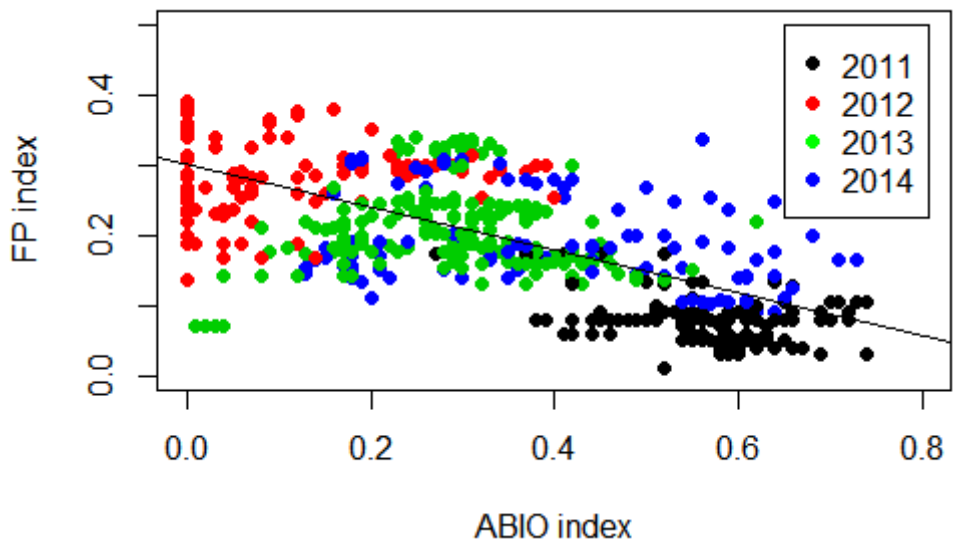


Figure 35 : Linear regression of FP index according to ABIO index over the 120 farms and over the period 2011-2014

IV.2. Assessment of robustness to fungal pressure

In the second part of the paper, an econometric model was defined in order to assess the sensitivity (or, equivalently, the robustness) of fungicide use intensity measured by the fungicide TFI to fungal pressure measured by FP index. This sensitivity was simply defined by the estimated parameters b_k associated with the FP index variable in Equation (2). Sensitivity parameters were assessed at the cropping system scale through the use of dummy variables. Despite its simplicity and parsimony, the

[6] The coefficient of correlation between the ABIO and FP indexes is equal to -0.66 (p-value < 0.01) over the whole sample of 145 farms.

model is statistically satisfactory, explaining nearly 65 % of TFI variability. Estimation results highlight that there is a "cropping system effect", namely that the response of fungicide use intensity to fungal pressure varies from one cropping system to another.

Equation (2) was estimated on 120 observations only after discarding 25 cropping systems for which estimated parameters appeared not realistic. Of the remaining 120 cropping systems, several estimated parameters associated with the FP index were negative (32 %); a few of them being negative and statistically lower than zero (11 %). Such results are contrary to *a priori* expectations and can be explained by the simplicity of Equation (2), i.e., an incomplete representation of the very numerous factors that influence fungicide use intensity and its variability over time and space. Among these factors, a possible explanation is that the FP index was not properly calibrated for each farm in view of the limitations already discussed. It is also very likely that the implementation of the Ecophyto plan may have induced the adoption of new agricultural practices by farmers, including the modification of crop protection programs. This specific context could explain that some farmers have adjusted fungicide use intensity, regardless of the intensity of fungal pressure. Many other factors such as expected yields, risk aversion or on-farm economic situation were not taken into account either.

Based on regression results, we tried to analyze if agricultural practices can explain the differences among the 120 cropping systems in terms of fungicide use intensity under average and changing pest conditions. Two approaches were conducted simultaneously. In the first approach, the 120 cropping systems were positioned within four quadrants using regionalized average TFI in conditions of average fungal pressure and regionalized means of TFI sensitivity to FP index as cut-offs for the quadrants. The four quadrants correspond to cropping systems with: high TFI, low sensitivity (Q1); high TFI, high sensitivity (Q2); low TFI, low sensitivity (Q3); and low TFI, high sensitivity (Q4).

Several agricultural practices differentiated the cropping systems with high TFI (quadrants Q1 and Q2) from those with low TFI (quadrants Q3 and Q4). Differentiating practices corresponded mainly to management intensification practices, notably a strong reliance on nitrogen fertilization, the use of latter varieties and a high frequency of soil tillage practices in quadrants Q1 and Q2. This result is of course not a surprise and is abundantly documented in the literature (Oerke, 2006; Bürger *et al.*, 2008). More surprisingly, the only rotation practice that emerged as significantly different between cropping systems with high *versus* low TFI was the reduced frequency of cereals in the rotations. However, this result has to be treated with caution given the fact that an increase of cereals in the rotation does not necessarily mean that the frequency of wheat in the rotation is increasing. Kirkegaard *et al.* (2008) showed that the positive "disease control" effect induced by break crop depends on various factors, including the nature of the cropping system and the host status of the proposed break crop. Deeper investigations will be required for a greater understanding of the relationship between the frequency of cereals in the rotations and the intensity of fungicide use on wheat crop.

Only one agricultural practice was statistically different when the cropping systems with low TFI sensitivity (quadrants Q1 and Q3) were compared to cropping systems with high sensitivity to fungal pressure (quadrants Q2 and Q4), namely the use of later wheat varieties at heading stage in cropping systems of quadrants Q2 and Q4. This practice was already discriminating the cropping systems with high TFI from those with low TFI in conditions of average fungal pressure. This result can be explained by the fact that later wheat varieties are usually accompanied by earlier sowing dates, resulting in faster growths of wheat crops in spring and, correlatively, a higher (or more

prolonged) exposure to fungal diseases in spring (Colbach *et al.*, 1997). However, no significant differences were observed in terms of average sowing date in our sample that could support that hypothesis.

The second approach used to analyze fungicide performances of wheat cropping systems was based on a cropping system typology. The 120 cropping systems were distributed according to the six clusters defined in Urruty *et al.* (2016d) and differentiated on the basis of two types of rotations (simplified *versus* diversified) and three types of management practices (high intensive, inflexible management practices; moderately intensive, flexible management practices; and low intensive, inflexible management practices).

Average TFIs were significantly lower on farms relying on low intensive management practices (type M3) compared to farms implementing highly intensive (type M1) or moderately intensive (type M2) practices; this was true for both simplified (type R1) and diversified (type R2) rotations. This result is not surprising given the fact that total pesticide use intensity was included as an entry variable in the typology used to define the three contrasting profiles of wheat management practices (Urruty *et al.,* 2016d). Another option would have been to define a new typology by removing the variable of pesticide use but this alternative would have complicated the comparability of results among the different papers. A more surprising result, but consistent with those derived from the four-quadrant approach, is that no significant differences in terms of average TFI were found from the pairwise comparison of diversified (type R2) *versus* simplified (type R1) rotations when the other cropping system characteristics were the same (pairwise comparison of R2M1 vs. R1M1, R2M2 vs. R1M2 and R2M3 vs. R1M3).

The results concerning the relative performances of the six clusters in terms of TFI sensitivity to fungal pressure are even less marked, yielding primarily non-significant difference tests. Only two pairwise comparisons of clusters were significant: the cropping systems of clusters R2M2 (diversified rotations with moderately intensive, flexible management practices) and R1M3 (simplified rotations with low intensive, inflexible management practices) appeared less sensitive to fungal pressure than those of cluster R1M2 (simplified rotations with moderately intensive, flexible management practices). Paradoxically, diversified rotations appear to be a key factor in clusters of type M2 to reduce TFI sensitivity to fungal pressure, whereas the opposite was true in clusters of type M3. A direct interpretation of these contrasting results would be that the benefits associated with the diversification of crop rotations will not lead to the same results (in term of TFI) depending on whether management practices are intensive or extensive. However, this interpretation needs to be confirmed by additional research relying notably on new cropping systems, including cropping systems not included in the plan Ecophyto. In summary, our analysis shows that several agricultural practices can discriminate high *versus* low fungicide use intensity under average fungal pressure but very few the robustness *versus* sensitivity of cropping systems to fungal pressure. Different assumptions for explaining such a feature can be proposed.

First of all, our results are based on a specific sample of French wheat-growing farms participating in the pesticide-reduction plan Ecophyto. This implies that these farmers have all adopted new agricultural practices from 2011 to reduce pesticide use intensity, including fungicide use. The specific nature of this dataset may explain, at least in part, the limited number of agricultural practices differentiating robust *versus* sensitive cropping systems to fungal pressure.

A second and not exclusive explanation is that farmers adjust fungicide use intensity in accordance to many variables and not only on the basis of fungal pressure. In particular, one can assume that farmers first set a yield target to be reached in average weather and pest conditions (Risbey *et al.*, 1999). To secure this target, they usually define their crop protection programs in such a way as they meet expected yields as often as possible. In addition, because farmers are risk adverse, they define crop protection programs by incorporating a sufficient safety margin (Carpentier and Barbier, 2005). From that perspective, adjusting crop protection programs to annual pest conditions may come only second for at least some farmers.

A third explanation may be due to agricultural practices that were analyzed in this paper. Several agricultural practices that have potential benefits to reduce the incidence of plant diseases were not documented in the database and therefore not included in the study. Among them, it would have been interesting to have information about soil fertility and soil organic matter (Ghorbani *et al.*, 2008), seed treatment (Khan *et al.*, 2006), crop nutrition and the availability of these nutrients in plant tissues (Walters and Bingham, 2007), farm management of retained stubbles (Kirkegaard *et al.*, 2008) and the density of wheat crops in the local area (Colbach *et al.*, 1997).

Exploring these three hypothesis and very likely other possible explanations are avenues for further research and a better identification of agronomic and non-agronomic drivers that can be mobilized for reducing pesticide use intensity on wheat.

V.Conclusion

In this paper, agricultural and pesticide records were used to assess the robustness of cropping systems producing wheat in the face of biotic perturbations. An original framework linking fungicide use intensity to an index of fungal pressure was used to identify and characterize robust cropping systems to fungal pressure. Our results show that the response of fungicide use intensity to fungal pressure differs from one cropping system to another. While several differences were identified among cropping systems with high *versus* low average fungicide use, fewer significant differences however were highlighted among robust *versus* sensitive cropping systems to fungal pressure. These findings therefore suggest that the use of pesticides by farmers is driven by multiple factors, including fungal pressure but also individual farming conditions and economic arguments.

The methodological approach used in this paper is the same as the one we used to characterize yield robustness in the face of abiotic perturbations. In the latter, increasing the robustness meant to reduce the impacts of abiotic perturbations on wheat yield. In this case, increasing the robustness means to minimize the need for pesticides by optimizing the cropping system and reduce the incidence of pests. In the future, a more elaborate model could be developed by combining the effects of both abiotic and biotic limiting factors on wheat yield. Due to increasing risks and uncertainties surrounding the future of agriculture, the ultimate goal is to develop robust cropping systems to changing weather and pest conditions.

VI. References

Afzal, S.N., Haque, M., Ahmedani, M., Bashir, S., Rattu, A., 2007. Assessment of yield losses caused by Puccinia striiformis triggering stripe rust in the most common wheat varieties. Pakistan Journal of Botany 39, 2127-2134.

Barzman, M., Bàrberi, P., Birch, A.N.E., Boonekamp, P., Dachbrodt-Saaydeh, S., Graf, B., Hommel, B., Jensen, J.E., Kiss, J., Kudsk, P., 2015. Eight principles of integrated pest management. Agronomy for Sustainable Development 35, 1199-1215.

Bretag, T., Keane, P., Price, T., 1995. Effect of ascochyta blight on the grain yield of field peas (Pisum sativum L.) grown in southern Australia. Animal Production Science 35, 531-536.

Bürger, J., de Mol, F., Gerowitt, B., 2008. The "necessary extent" of pesticide use—Thoughts about a key term in German pesticide policy. Crop Protection 27, 343-351.

Bürger, J., de Mol, F., Gerowitt, B., 2012. Influence of cropping system factors on pesticide use intensity – A multivariate analysis of on-farm data in North East Germany. European Journal of Agronomy 40, 54-63.

Carpentier, A., Barbier, J-M., 2005. Aspects économiques de la régulation des pollutions par les pesticides. In: Aubertot, J-N., Barbier, J-M., Carpentier, A., Gril, J-N., Guichard, L., Lucas, P., Savary, S., Savini, I., Voltz, M. (Eds). Pesticides, agriculture et environnement : Réduire l'utilisation des pesticides et en limiter les impacts environnementaux. Rapport d'expertise INRA et Cemagref, 245 p.

Cartes&Données, 2015. Description of the spatial interpolation method. In: CD7 Online – Articque Ed.

Chakraborty, S., Newton, A.C., 2011. Climate change, plant diseases and food security: an overview. Plant Pathology 60, 2-14.

Coakley, S.M., Scherm, H., Chakraborty, S., 1999. Climate change and plant disease management. Annual review of phytopathology 37, 399-426.

Colbach, N., Lucas, P., Meynard, J.-M., 1997. Influence of crop management on take-all development and disease cycles on winter wheat. Phytopathology 87, 26-32.

Ecophyto Plan, 2008. Réduction des Usages de Pesticides 2008–2018. Available from h u. M (http://agriculture.gouv.fr/IMG/pdf/PLAN_ECOPHYTO_2018-2-2-2_cle8935ee.pdf).

Fried, G., 2010. Variations spatiales et temporelles des communautés adventices des cultures annuelles en France. Acta Botanica Gallica 157, 183-192.

Geiger, F., Bengtsson, J., Berendse, F., Weisser, W.W., Emmerson, M., Morales, M.B., Ceryngier, P., Liira, J., Tscharntke, T., Winqvist, C., 2010. Persistent negative effects of pesticides on biodiversity and biological control potential on European farmland. Basic and Applied Ecology 11, 97-105.

Godfray, H.C.J., Beddington, J.R., Crute, I.R., Haddad, L., Lawrence, D., Muir, J.F., Pretty, J., Robinson, S., Thomas, S.M., Toulmin, C., 2010. Food security: the challenge of feeding 9 billion people. Science 327, 812-818.

Ghorbani, R., Wilcockson, S., Koocheki, A., Leifert, C., Soil management for sustainable crop disease control: a review. Environmental Chemistry Letters 6, 149-162.

Gravesen, L., 2003. The Treatment Frequency Index: an indicator for pesticide use and dependency as well as overall load on the environment. Pure Conference, pp. 28-30.

Hartkamp, A.D., De Beurs, K., Stein, A., White, J.W., 1999. Interpolation techniques for climate variables. CIMMYT, Mexico, 26 p.

Hossard, L., Guichard, L., Pelosi, C., Makowski, D., 2017. Lack of evidence for a decrease in synthetic pesticide use on the main arable crops in France. Science of The Total Environment 575, 152-161.

Inserm, 2013. Pesticides, effets sur la santé. Expertise collective, synthèse et recommandations. Les Editions INSERM, Paris (France).

Khan, M., Fischer, S., Egan, D., Doohan, F., 2006. Biological Control of Fusarium Seedling Blight Disease of Wheat and Barley. The American Phytopathological Society 96, 386-394.

Kirkegaard, J., Christen, O., Krupinsky, J., Layzell, D., 2008. Break crop benefits in temperate wheat production. Field Crops Research 107, 185-195.

Lamichhane, J.R., Barzman, M., Booij, K., Boonekamp, P., Desneux, N., Huber, L., Kudsk, P., Langrell, S.R., Ratnadass, A., Ricci, P., 2014. Robust cropping systems to tackle pests under climate change. A review. Agronomy for Sustainable Development 35, 443-459.

Launay, M., Caubel, J., Bourgeois, G., Huard, F., Garcia de Cortazar-Atauri, I., Bancal, M.-O., Brisson, N., 2014. Climatic indicators for crop infection risk: Application to climate change impacts on five major foliar fungal diseases in Northern France. Agriculture, Ecosystems & Environment 197, 147-158.

Lechenet, M., Makowski, D., Py, G., Munier-Jolain, N., 2016. Profiling farming management strategies with contrasting pesticide use in France. Agricultural Systems 149, 40-53.

Lloyd, C.D., 2005. Assessing the effect of integrating elevation data into the estimation of monthly precipitation in Great Britain. Journal of Hydrology 308, 128-150.

Lu, G.Y., Wong, D.W., 2008. An adaptive inverse-distance weighting spatial interpolation technique. Computers & Geosciences 34, 1044-1055.

Luck, J., Spackman, M., Freeman, A., Tre˛bicki, P., Griffiths, W., Finlay, K., Chakraborty, S., 2011. Climate change and diseases of food crops. Plant Pathology 60, 113-121.

Mailliard, A., Cadot, V., Ravenel, C., Marques, S., Bossuet, L.M., Masson, F., Lorgeou, J., Du Cheyron, P., Obeuf, A., Picard, A. , Gaufreteau, A., Mistou, M.N., Jeuffroy, M.H., 2013. Diversification du réseau CTPS pour une meilleure caractérisation de l'adaptation des variétés de blé tendre à des itinéraires techniques à hautes performances environnementales. Projet Contrat de branche – Convention C2008-26, 191 p.

Meynard, J.-M., Doré, T., Lucas, P., 2003. Agronomic approach: cropping systems and plant diseases. Comptes Rendus Biologies 326, 37-46.

Mundt, C.C., Cowger, C., Garrett, K.A., 2002. Relevance of integrated disease management to resistance durability. Euphytica 124, 245-252.

Oerke, E.-C., 2006. Crop losses to pests. The Journal of Agricultural Science 144, 31-43.

Oliver, M.A., Webster, R., 1990. Kriging: a method of interpolation for geographical information systems. International Journal of Geographical Information System 4, 313-332.

Pannell, D.J., 1991. Pests and pesticides, risk and risk aversion. Agricultural Economics 5, 361-383.

Ratnadass, A., Fernandes, P., Avelino, J., Habib, R., 2012. Plant species diversity for sustainable management of crop pests and diseases in agroecosystems: a review. Agronomy for sustainable development 32, 273-303.

Risbey, J., Kandlikar, M., Dowlatabadi, H., Graetz, D., 1999. Scale, context, and decision making in agricultural adaptation to climate variability and change. Mitigation and adaptation strategies for global change 4, 137-165.

Rusch, A., Valantin-Morison, M., Sarthou, J.P., Roger-Estrade, J., 2010. Integrating crop and landscape management into new crop protection strategies to enhance biological control of oilseed rape insect pests. Biocontrol-Based Integrated Management of Oilseed Rape Pests. Springer, pp. 415-448.

Savary, S., Stetkiewicz, S., Brun, F., Willocquet, L., 2015. Modelling and mapping potential epidemics of wheat diseases—examples on leaf rust and Septoria tritici blotch using EPIWHEAT. European Journal of Plant Pathology 142, 771-790.

Steinbuch, L., Brus, D.J., van Bussel, L.G.J., Heuvelink, G.B.M., 2016. Geostatistical interpolation and aggregation of crop growth model outputs. European Journal of Agronomy 77, 111-121.

Urruty, N., Deveaud, T., Guyomard, H., Boiffin, J., 2016a. Impacts of agricultural land use changes on pesticide use in French agriculture. European Journal of Agronomy 80, 113-123.

Urruty, N., Tailliez-Lefebvre, D., Huyghe, C., 2016b. Stability, robustness, vulnerability and resilience of agricultural systems. A review. Agronomy for Sustainable Development 36, 1-15.

Urruty, N., Guyomard, H., Tailliez-Lefebvre, D., Huyghe, C. 2016c. Designing high yielding and robust wheat crops, 2- Characterization and assessment of yield robustness to abiotic perturbations. (Submitted to the European Journal of Agronomy).

Urruty, N., Guyomard, H., Tailliez-Lefebvre, D., Huyghe, C. 2016d. Assessment of wheat yield performances under average and changing weather conditions. (Submitted to Fields Crop Research).

Urruty, N., Guyomard, H., Tailliez-Lefebvre, D., Huyghe, C. 2016e. Designing high yielding and robust wheat crops, 1- Characterization and quantification of abiotic perturbations on wheat growth and yield. (Submitted to the European Journal of Agronomy).

Walters, D.R., Bingham, I.J., 2007. Influence of nutrition on disease development caused by fungal pathogens: implications for plant disease control. Annals of applied biology 151, 307-324.

DISCUSSION GENERALE

Au début de ce travail, nous avions posé trois questions de recherche :

1. Comment définir la robustesse et en quoi ce concept peut-il être utile aux agronomes ?
2. Comment caractériser et quantifier la robustesse des performances en agriculture ?
3. Quels leviers mobiliser pour augmenter la robustesse des performances face aux perturbations abiotiques et biotiques ?

Dans ce chapitre, nous revenons sur ces trois questions de recherche afin de faire ressortir les principaux apports et limites de ce travail. Nous terminons cette discussion en soulignant les avantages et les limites associées à la valorisation d'un dispositif de recherche participative tel que le réseau DEPHY-FERMEcophyto.

I. Le concept de robustesse

I.1. Les apports conceptuels

Cette thèse s'intéresse à l'émergence d'un nouveau concept, celui de la robustesse. Son adoption et son opérationnalisation deviennent urgents du fait des menaces et des tensions qui pèsent sur la planète en raison de l'inadéquation entre notre modèle de développement et la raréfaction des ressources naturelles disponibles sur la planète. Le contexte d'incertitudes croissant que nous connaissons nous pousse à adopter une nouvelle vision qui prenne mieux en compte la variabilité des performances dans un environnement changeant, et leur capacité à se maintenir face à cet environnement changeant.

L'introduction de ce concept de robustesse s'adresse particulièrement au contexte agricole. En effet, les incertitudes liées au changement climatique, à la volatilité des prix des produits et des intrants agricoles, aux impacts négatifs sur l'environnement, etc., créent un contexte défavorable à l'élaboration des performances sous le *paradigme du contrôle*. Au lieu de chercher à maximiser les performances moyennes en contrôlant le milieu et en ayant recours à des intrants extérieurs à l'exploitation agricole, le *paradigme de la robustesse* consiste à appréhender le milieu comme un environnement changeant et à accepter ces contraintes. L'enjeu est alors d'apprendre à anticiper et à s'adapter à cet environnement changeant afin de réduire l'impact des perturbations sur les performances.

Tout un champ de la littérature scientifique s'intéresse à ce nouveau paradigme et à l'adaptation des systèmes agricoles face à un environnement changeant. Le concept de robustesse côtoie ceux de résilience, de vulnérabilité ou encore de stabilité. Les ponts sont nombreux entre ces différents concepts et il serait inutile de chercher à les hiérarchiser ou les classer. Le concept de robustesse nous a néanmoins paru le plus intéressant en raison de son opérationnalité, notamment dans le contexte agricole. Quelques travaux récents ont d'ailleurs permis son application dans les systèmes d'élevage (voir, par exemple, de Goede (2014) ou Ollion (2015)). Dans les systèmes de grandes cultures, en revanche, son application et son opérationnalité sont restées limitées. Cette thèse visait donc à mieux définir ce concept de robustesse afin de déterminer son potentiel pour mieux évaluer les performances des systèmes agricoles face à un contexte croissant d'incertitudes.

Dans cette thèse, la robustesse est définie comme la capacité d'un système donné à maintenir ses performances malgré des changements du contexte, c'est-à-dire malgré l'apparition de

perturbations. Cette définition assez large permet de décliner ce concept à de nombreuses problématiques agricoles à travers différents objets d'études (variétés, cultures, systèmes de culture), différentes performances (productives, économiques, environnementales, voire sociales) et différentes perturbations (climat, bioagresseurs, marchés, politiques publiques). Le cadre conceptuel de la robustesse permet ainsi d'appréhender des questions complexes, telles que l'interaction entre le rendement et le climat ou l'interaction entre l'utilisation de pesticides et le niveau de pression maladies, de manière originale.

I.2. Les conditions d'opérationnalité du concept de robustesse

Néanmoins, la mise en pratique de ce concept de robustesse impose de clarifier son cadre d'usage afin d'éviter de tomber dans le même travers que celui lié à la résilience, à savoir une confusion étymologique qui limite aujourd'hui son opérationnalité. Il apparaît donc important d'insister sur la nécessité de se poser des questions simples, mais nécessaires, lorsque l'on veut étudier la robustesse d'un système donné : robustesse *de quoi/de qui ?, à quoi ?,* et *pour quoi ?* Et c'est à partir des réponses à ces questions simples que l'on pourra s'intéresser à la question suivante : la robustesse, *comment y parvenir* ?

- Robustesse *de quoi/de qui* ? Il s'agit ici de définir l'objet d'étude, c'est-à-dire les limites du système étudié. Ce choix dépend évidemment de la question de recherche que l'on se pose. Les limites du système étudié peuvent être étroites (cas de la production de blé sur une exploitation donnée) à très larges (production de blé sur l'ensemble d'un territoire, d'un pays, de la planète). L'échelle temporelle peut également varier : de l'échelle annuelle (cas d'une culture comme le blé) à l'échelle pluriannuelle (cas d'un système de culture).
- Robustesse *à quoi* ? Il s'agit ici de s'intéresser à l'environnement dans lequel évolue le système. Les variations de cet environnement qui sont susceptibles d'impacter les performances du système étudié sont appelées perturbations. Ces dernières peuvent être de différentes natures (météorologiques, climatiques, économiques, biotiques, etc.), de différentes fréquences (de très rares à très communes) et de différentes intensités. Le choix des perturbations doit être évidement réfléchi en fonction de la nature et des échelles du système défini précédemment. A l'échelle d'une culture comme le blé, il convient ainsi de privilégier des perturbations qui sont temporellement cohérentes avec son cycle cultural (via l'utilisation d'indicateurs phénoclimatiques définis sur des stades phénologiques précis ou via un modèle de culture qui simule la croissance du blé au cours du temps).
- Robustesse *pour quoi* ? Il s'agit enfin de définir la ou les performances du système dont on veut étudier la robustesse. Ces performances doivent être choisies de manière cohérente avec les perturbations et les échelles du système étudié. En particulier, il est préférable que la performance retenue soit directement, plutôt qu'indirectement, influencée par les perturbations étudiées même si les impacts indirects pourront être étudiés en fonction des résultats précédents. Par exemple, l'impact des perturbations abiotiques sur les revenus des agriculteurs peut être étudié indirectement à travers la robustesse du rendement face aux perturbations abiotiques.

Dans cette thèse, nous avons déployé le cadre d'analyse de la robustesse sur deux problématiques différentes : d'une part, la robustesse du rendement face aux perturbations abiotiques, et, d'autre part, la robustesse de l'intensité de la protection fongicide face aux perturbations biotiques. Ces deux problématiques ont été définies à l'échelle de la culture du blé tendre sur les exploitations

agricoles. Les deux indicateurs de perturbations abiotiques et biotiques ont alors été construits de manière à synthétiser l'ensemble des perturbations liées aux variations des conditions météorologiques et des maladies fongiques, respectivement. Le choix de la deuxième performance doit néanmoins être discuté car, à l'inverse de la performance rendement qui un indicateur de résultat, l'IFT fongicides est un indicateur de moyen (et non de résultat) de la performance environnementale. En outre, l'utilisation de fongicides répond à un objectif de rendement fixé par l'agriculteur. Cette bivalence de la performance IFT explique, au moins en partie, la difficulté que nous avons eu à identifier une relation claire entre cette performance et le niveau de perturbations biotiques.

I.3. Liens entre robustesse et performance moyenne

Comme indiqué en introduction de cette thèse, il est urgent de mieux prendre en considération, dans l'analyse de la durabilité des systèmes agricoles, la question de la robustesse de leurs performances face à un environnement changeant. Jusqu'à présent, ce sont principalement les performances moyennes qui ont été étudiées. Le cadre d'évaluation de la robustesse que nous avons défini doit permettre d'intégrer plus systématiquement la notion de robustesse dans ces analyses multicritères, et de mieux arbitrer les éventuels trade-offs entre valeur moyenne de la performance et sa robustesse. En effet, le cadre d'évaluation que nous avons défini permet de mesurer à la fois les performances du système étudié lorsque les conditions (climatiques, biotiques, etc.) sont moyennes, ou normales, et leur robustesse face à des changements du milieu.

Ce cadre d'évaluation de la robustesse nous permet ainsi d'apporter de nouveaux éléments pour juger de la durabilité d'un système agricole (Ingrand *et al.*, 2009). En effet, que faut-il conclure sur la durabilité d'un système agricole s'il présente une performance moyenne très élevée mais une robustesse faible? Face à un contexte croissant d'incertitudes, on pourra conclure que ce système n'est pas durable car il ne sera pas capable de résister à des conditions qui risquent de devenir de plus en plus hétérogènes à l'avenir. Le cadre d'évaluation développé permet ainsi d'analyser la relation entre performance moyenne et robustesse et d'évaluer si l'une des deux dimensions est pénalisée.

Pour ce qui est de la performance relative à l'intensité de la protection fongicide, l'application du cadre conceptuel de la robustesse est plus délicate, notamment en termes d'interprétation des résultats. En effet, alors que la robustesse du rendement est un élément positif pour l'agriculteur, il en va différemment pour la robustesse de l'IFT étant donné son influence sur d'autres performances, dont le rendement. En l'occurrence, est-il préférable d'avoir un IFT très robuste ou très peu robuste face aux perturbations biotiques ? Tout dépend de l'objectif de production de l'agriculteur encore une fois. Si ce dernier cherche à maximiser son rendement, il va probablement chercher à protéger ses cultures au maximum donc faire varier son intensité d'utilisation de fongicides en fonction du niveau de perturbation biotique. On mesurera alors un IFT peu robuste, i.e., s'ajustant à la pression de maladies. Par contre, si l'objectif est de minimiser l'utilisation de pesticides pour diminuer leurs impacts contraires sur l'environnement et la santé, on devrait observer un IFT faible face à des perturbations moyennes et robuste face à la variabilité des perturbations biotiques. L'IFT est donc une performance dont l'analyse de la performance moyenne et de la robustesse n'est pas aussi simple que celle du rendement. Nous y reviendrons dans la partie 2.2 de cette discussion.

II. Le cadre d'évaluation de la robustesse

Pour caractériser et mesurer la robustesse à l'échelle d'une culture comme le blé tendre, plusieurs méthodes ont été envisagées au cours de cette thèse. L'**annexe 7.1** présente une note synthétique de ces différentes approches. Assez schématiquement, deux types d'approches avaient été identifiés : d'une part, les approches qui décrivent la distribution des performances dans le temps (coefficient de variation, fonction de répartition, comparaison par rapport à la distribution d'une situation de référence) et, d'autre part, les approches qui décrivent la relation entre deux variables, et plus particulièrement entre une variable de performance et une variable de perturbation. Nous avons naturellement retenu les approches du deuxième groupe qui permettent d'étudier explicitement la relation entre une performance donnée et une perturbation, et s'inscrivent dans le cadre de questionnement de notre travail de recherche résumé supra : robustesse de *quoi*, *à quoi* et *pour quoi* ?

Le cadre d'évaluation de la robustesse défini précédemment a été appliqué sur un échantillon de 145 exploitations agricoles et 2300 parcelles de blé tendre en France. Nous revenons dans cette partie sur les principales étapes méthodologiques, ainsi que sur les limites ou les difficultés qui sont apparues au cours de l'application de ce cadre d'évaluation de la robustesse sur les performances « rendement » et « intensité de la protection fongicide ».

II.1. Robustesse du rendement face aux perturbations abiotiques

II.1.1. Classification des environnements de la culture de blé tendre

En vue de caractériser la robustesse du rendement face aux perturbations abiotiques, un premier travail a été conduit autour de la caractérisation, à l'échelle de l'exploitation agricole, des principaux facteurs abiotiques limitants du rendement du blé tendre. Ces derniers ont été étudiés à travers 15 indicateurs phénoclimatiques mesurés à des stades phénologiques précis. Le calcul de ces 15 indicateurs sur la période 1983-2014 a permis de caractériser, pour chaque exploitation, l'environnement de la culture du blé tendre : fréquence et intensité des épisodes de gel, de déficit hydrique, d'échaudage thermique, etc.

Une classification de ces environnements a ensuite été réalisée à partir des valeurs moyennes de ces 15 indicateurs sur la période 1983-2014. Des méthodes statistiques d'évaluation des dissimilarités par classification ascendante hiérarchique (méthode de Ward) ont alors permis de définir un nombre limité d'environnements de culture de blé tendre en France. Six types d'environnements contrastés ont pu être identifiés (zones A à F) sur la base de l'indicateur statistique d'Hubert-Levin (minimisation de la variance intra-classe et maximisation de la variance interclasses). A partir de cette classification, nous avons alors considéré que les exploitations agricoles présentes dans une même zone connaissent des environnements relativement proches, à la fois en termes de nature et d'intensité des facteurs abiotiques limitants.

Un des principaux avantages de cette classification des environnements est qu'elle nous a permis de paramétrer finement le modèle de culture STICS et ainsi, de mesurer l'intensité des perturbations abiotiques de manière plus précise que si nous n'avions pas réalisé de zonage. Le nombre d'exploitations étant relativement le même au sein de chaque zone, cette approche nous a également permis de comparer les rendements observés sur les différentes exploitations, et de faire

ressortir des profils contrastés de rendement moyen et de robustesse dans chaque zone. Si le nombre d'environnements avait été plus élevé, c'est-à-dire si la fragmentation du territoire avait été plus grande, le nombre d'exploitations dans chaque zone aurait été réduit, rendant plus difficile l'identification de profils de robustesse contrastés. A l'inverse, une segmentation plus grossière aurait créé des zones avec des environnements trop hétérogènes, avec regroupement d'exploitations exposées à des conditions météorologiques trop différentes. Cette première discussion illustre la nécessité de définir des compromis dès lors que l'on s'intéresse à la mise en évidence de résultats de portée qui dépasse une exploitation individuelle. Elle montre aussi tout l'intérêt qu'il y aurait, à l'évidence, de disposer d'un échantillon de taille plus importante avec un nombre suffisant d'unités dans chaque zone qui in fine pourrait être retenue.

II.1.2. Construction de l'indicateur de perturbations abiotiques

Un indicateur de perturbations abiotiques (indicateur ABIO) a ensuite été développé à l'échelle de chaque parcelle de blé tendre afin de résumer l'intensité des facteurs abiotiques limitants sur l'ensemble du cycle du blé tendre. Cet indicateur a été construit en utilisant le modèle de culture STICS (Brisson *et al.*, 2002). Ce dernier permet de simuler les rendements du blé tendre en fonction des conditions météorologiques de l'année, des caractéristiques du sol et de la conduite des cultures. Néanmoins, en paramétrant le modèle STICS avec des caractéristiques du sol et une conduite du blé homogènes dans le temps, il est possible de détourner le modèle de son usage initial de façon à évaluer l'impact de la variabilité des conditions météorologiques sur le rendement du blé tendre. C'est cette modalité d'utilisation qui a été mobilisée dans cette thèse. L'indicateur ABIO a alors été calculé annuellement en mesurant l'amplitude entre le rendement simulé sur la parcelle étudiée et le rendement maximal simulé sur la période 1983-2014. Plus cette amplitude est grande, plus il est possible de considérer que les conditions météorologiques ont été difficiles (indicateur ABIO élevé). A l'inverse, plus l'écart est faible, plus les conditions météorologiques de l'année ont été favorables à la culture de blé (indicateur ABIO proche de zéro). Cet indicateur ABIO a ainsi été calculé à l'échelle de chaque parcelle de blé tendre sur la période 2011-2014 sur la base des conditions météorologiques observées sur la période 1983-2014 et des caractéristiques pédologiques de chaque parcelle.

Le paramétrage de la conduite culturale dans le modèle STICS a été réalisé de façon homogène pour toutes les exploitations agricoles appartenant à un même environnement, c'est-à-dire à une même zone géographique. Le modèle a donc été paramétré, non pas avec les pratiques réellement observées sur chaque exploitation agricole mais avec les pratiques moyennes observées à l'échelle de chaque zone géographique (date de semis moyenne, précocité variétale moyenne, dates et doses de fertilisation moyennes, etc.). L'indicateur de perturbations abiotiques ainsi défini est donc indépendant des pratiques agronomiques de chaque exploitation. C'est ce paramétrage spécifique du modèle STICS qui nous a permis, par la suite, d'expliquer les différences de robustesse d'une exploitation à l'autre en fonction des caractéristiques agronomiques de chacune.

Cette méthode de quantification des perturbations abiotiques avec le modèle STICS présente l'avantage de synthétiser en un seul indicateur l'impact de plusieurs perturbations abiotiques annuelles sur le rendement du blé. Les performances du modèle STICS ayant été validées à plusieurs reprises pour les conditions pédoclimatiques françaises (Coucheney *et al.*, 2015), nous avons choisi d'utiliser ce modèle. Une méthode alternative aurait été de réutiliser les indicateurs phénoclimatiques calculés pour caractériser les différents environnements de la culture de blé

tendre en France, et de les agréger sous la forme d'un indicateur unique (Caubel *et al.*, 2015). Séduisante d'un point de vue mathématique, cette option présente néanmoins de nombreuses limites du fait de la nécessaire subjectivité requise pour définir les facteurs de pondération utilisés pour l'agrégation des indicateurs phénoclimatiques. Il serait néanmoins intéressant de développer cette approche alternative, ne serait-ce que pour apprécier la robustesse de nos résultats empiriques.

Certaines limites méthodologiques doivent néanmoins être évoquées concernant cette approche basée sur une utilisation spécifique d'un modèle de culture de façon à en déduire un index de perturbations abiotiques. En premier lieu, on soulignera qu'il est assez difficile d'évaluer la qualité de cet indicateur ABIO car le paramétrage du modèle a été effectué avec des pratiques moyennes et non pas avec les pratiques réellement observées à l'échelle de chaque exploitation. On ne peut donc pas comparer, comme c'est l'usage habituellement, les rendements simulés avec les rendements observés de chaque exploitation. Néanmoins, pour contourner ce problème et vérifier la cohérence globale des résultats, nous avons comparé la moyenne des rendements simulés avec la moyenne des rendements observés dans chaque zone géographique au cours de la période 2011-2014. Les résultats indiquent que ces deux types de rendements ne sont pas significativement différents sur l'ensemble de la période 2011-2014. Ces différences sont néanmoins significatives quand l'analyse porte sur les seules années 2011 et 2012 considérées isolément. En 2011 (respectivement 2012), les rendements simulés sont inférieurs (respectivement supérieurs) aux rendements observés. Ces résultats démontrent la forte sensibilité du modèle STICS à la variabilité des conditions météorologiques, ce qui est un élément positif dans l'optique de construire un indicateur de perturbations abiotiques. Le modèle étant particulièrement sensible aux conditions hydriques, les rendements simulés en 2011, année caractérisée par un printemps très sec, sont très faibles alors que les rendements simulés en 2012, année humide, sont très élevés.

Malgré ces bonnes performances globales, certains résultats produits par le modèle STICS ont toutefois été écartés car ils présentaient des écarts jugés trop importants avec les résultats observés. C'est le cas notamment des simulations de rendements correspondant à l'année 2012 et à la zone F (régions Lorraine et Champagne-Ardenne) : les rendements simulés ont été jugés trop élevés et surtout non représentatifs des mauvais rendements observés en raison de l'épisode de gel intense (10 jours à -10°C sans couverture neigeuse) et du faible endurcissement des cultures. Ce résultat montre que le modèle STICS présente certaines limites et ne permet pas de simuler des processus complexes comme l'endurcissement des cultures face aux températures froides, pas plus que la défaillance de pollinisation lors de périodes froides au moment de la méiose, comme dans certaines régions en 2016. Concrètement, les exploitations de la zone F pour l'année 2012 n'ont donc pas été retenues dans la suite de l'analyse.

II.1.3. Approche économétrique pour évaluer la robustesse du rendement

Pour évaluer, à l'échelle de chaque système de culture, la robustesse du rendement du blé face aux perturbations abiotiques, un modèle économétrique a été développé (Equation 1). Les deux variables explicatives de ce modèle sont l'indicateur ABIO et la réserve en eau du sol, ces deux dernières étant définies à l'échelle du système de culture par le biais de variables indicatrices prenant la valeur 1 pour le système de culture considéré, 0 sinon :

$$y_{ikt} = c + [a_k.D(k)].AWC_i + [b_k.D(k)].ABIO_{it} \quad (1)$$

où y_{ikt} est le rendement observé sur la parcelle i dans le système de culture k l'année t, $D(k)$ est la variable indicatrice correspondant au système de culture k, AWC_i est la réserve utile de la parcelle i et $ABIO_{it}$ est l'index de perturbations abiotiques mesuré sur la parcelle i l'année t.

La robustesse (ou inversement la sensibilité) du rendement de chaque système de culture est ainsi mesurée par le coefficient b_k associé à l'indicateur ABIO. En intégrant la variable de la réserve utile comme seconde variable explicative, ce modèle économétrique permet, d'une part, de mieux estimer le potentiel de rendement de chaque système de culture, et, d'autre part, de mesurer la robustesse du rendement face aux perturbations abiotiques indépendamment des caractéristiques pédologiques. Le coefficient b_k estimé pour chaque système de culture est, en quelque sorte, « purgé » de l'effet de la réserve en eau du sol. Par conséquent, les différences de robustesse d'un système à l'autre, mesurées à travers leurs différences sur le coefficient b_k, ne peuvent être reliées qu'à des différences de pratiques agronomiques (au sens large) et non à des différences liées aux caractéristiques pédologiques. La variable de la réserve utile a été sélectionnée car elle permet de synthétiser plusieurs caractéristiques des sols : leur profondeur, leur texture, leur teneur en cailloux, etc. Néanmoins, on soulignera le fait que cette variable n'est pas toujours correctement renseignée pour chaque parcelle, voire chaque exploitation du réseau FERMEcophyto. Cette incertitude a été, autant que possible, minimisée en complétant les informations de la base de données FERMEcophyto avec celles de la base de données régionales des sols d'ARVALIS-Institut du Végétal.

Bien que simple et parcimonieux en termes de variables explicatives, le modèle économétrique développé est satisfaisant d'un point de vue statistique puisqu'il explique les trois quarts de la variance du rendement du blé. En outre et de façon plus importante, près de la moitié des coefficients b_k associés à la variable de perturbations abiotiques différenciée par système de culture sont statiquement différents les uns des autres. Ceci nous permet de mettre en évidence, d'un point de vue statistique, un effet système de culture sur la robustesse du rendement du blé et un impact des caractéristiques de ces systèmes de culture sur la robustesse du rendement face aux perturbations abiotiques.

Les niveaux de robustesse du rendement, estimés à travers les coefficients b_k associés à chaque système de culture, ont ensuite été comparés à l'échelle nationale en prenant en compte les disparités régionales. Pour ce faire, le zonage issu de la classification des environnements de la culture de blé tendre a été réutilisé afin de comparer les rendements moyens et la robustesse des rendements entre les exploitations de chaque zone, c'est-à-dire entre des exploitations ayant été soumises à des perturbations proches, à la fois en nature et en intensité. Si nous n'avions pas utilisé ce zonage, l'effet régional aurait masqué les différences de performances en raison des écarts de

potentiels de rendement et d'exposition aux perturbations abiotiques d'une région à l'autre. Pour contourner ce problème, nous avons utilisé ce zonage géographique pour identifier, au sein de chaque zone, les différents profils de systèmes de culture au regard de deux critères : d'une part, le rendement moyen (c'est-à-dire le rendement obtenu face à des perturbations abiotiques moyennes) et, d'autre part, la robustesse du rendement face à des perturbations abiotiques. Une fois discriminés en fonction de ces deux critères, les différents profils de systèmes de culture dans chaque zone géographique ont été regroupés à l'échelle nationale afin de pouvoir étudier les pratiques agronomiques permettant d'expliquer les différences de robustesse.

II.1.4. Perspectives d'amélioration du modèle

L'approche méthodologique utilisée nous a permis de caractériser et comparer la robustesse du rendement du blé sur un échantillon de plus de 130 exploitations agricoles. La forme linéaire du modèle économétrique (équation (1)) présente l'avantage de la simplicité et a déjà été utilisée par de nombreux auteurs pour analyser la réponse du rendement d'une culture à un indicateur de stress (voir, par exemple, Rizza *et al.* (2004) ou Lipiec *et al.* (2013)). Avec plus de données, et en particulier des effectifs de parcelles plus fournis dans chaque exploitation, d'autres formes auraient néanmoins pu être imaginées, linéaires ou non linéaires. Par exemple, des formes polynomiales ou en plateau auraient peut-être permis de mieux modéliser la fonction de perte de rendement face aux perturbations abiotiques. Néanmoins, en l'absence de connaissances empiriques sur l'impact de l'indicateur ABIO sur le rendement, il était peu justifié d'imaginer arbitrairement une forme compliquée de modèle d'effet. Avec l'acquisition de nouvelles données et l'ajout de nouvelles années d'enquêtes, des améliorations du modèle seront bientôt envisageables. Il est certain que la précision de ce modèle d'évaluation de la robustesse s'améliorera au fil des années grâce à l'agrandissement du dispositif expérimental.

A l'avenir, ce modèle pourra également être amélioré avec l'intégration de nouvelles variables permettant, potentiellement, de mieux expliquer la variabilité du rendement. De nouvelles perturbations pourraient être intégrées dans ce modèle initial, par exemple l'intensité de la pression maladies (indicateur FP calculé dans le chapitre 6). Au cours de cette thèse, un second modèle de régression (équation (2)), plus complet que le premier, avait été imaginé en intégrant à la fois la réserve utile, le niveau de perturbations abiotiques, le niveau de pression maladies et le niveau de protection fongicides (IFT fongicides) :

$$y_{ikt} = e + [a_k.D(k)].AWC_i + [b_k.D(k)].ABIO_{it} + [c_k.D(k)].BIO_{it} \times (1 + [d_k.D(k)].TFI_{it}) \quad (2)$$

où y_{ikt} est le rendement observé sur la parcelle i dans le système de culture k l'année t, $D(k)$ est la variable indicatrice correspondant au système de culture k, AWC_i est la réserve utile de la parcelle i, $ABIO_{it}$ est l'index de perturbations abiotiques mesuré sur la parcelle i l'année t, BIO_{it} est l'indicateur de pression fongique mesuré sur la parcelle i l'année t, et TFI_{it} est l'indice de fréquence de traitement (IFT) fongicides mesuré sur la parcelle i l'année t.

Le terme ($[c_k.D(k)].BIO_{it} \times (1 + [d_k.D(k)].TFI_{it})$) ajouté dans le terme de droite de l'équation à estimer permet de prendre en compte l'influence de la pression fongique corrigée de l'utilisation de fongicides. Ce modèle plus complet permet d'évaluer la robustesse du rendement face à plusieurs perturbations à la fois. Malheureusement, la corrélation trop forte entre les deux indicateurs ABIO et BIO (coefficient de corrélation égal à 0.66 ; voir chapitre 6), ainsi que le nombre de parcelles trop faibles dans certaines exploitations n'ont pas permis d'estimer ce modèle de façon

satisfaisante. L'interaction entre le niveau d'utilisation de pesticides et le niveau de pression maladies mesuré à l'échelle de chaque système de culture a donc été étudiée indépendamment, à travers un second modèle de régression linéaire.

II.2. Robustesse de l'IFT fongicides face aux perturbations biotiques

La problématique de la réduction de l'utilisation de pesticides en agriculture est au cœur des préoccupations depuis de nombreuses années, à la fois au niveau des politiques publiques, des agriculteurs et des citoyens. Elle s'est renforcée depuis la fin des années 2000 avec la mise en place du Plan Ecophyto (2008) et sa prolongation en 2015.

Parmi l'ensemble des indicateurs permettant de mesurer le niveau d'utilisation de pesticides à l'échelle de la parcelle, d'un système de culture et d'une exploitation agricole, l'Indice de Fréquence de Traitement (IFT) est le plus fréquemment utilisé. Toutefois, sa variabilité dans le temps et dans l'espace, de même que les déterminants de cette variabilité, sont relativement peu connus. Dans cette thèse, nous avons donc analysé la variabilité de cet indicateur, plus précisément de l'IFT fongicides, sur l'ensemble des parcelles de blé tendre du réseau FERMEcophyto au cours de la période 2011-2014. Le cadre d'analyse de la robustesse défini pour caractériser la sensibilité du rendement aux perturbations abiotiques a donc été utilisé cette fois pour étudier la sensibilité de l'IFT fongicides à un indicateur de pression maladies.

L'application de notre cadre d'analyse de la robustesse au cas de l'utilisation des pesticides soulève plusieurs questions, dont certaines ont déjà été évoquées au début de cette discussion générale. Alors que l'IFT est un indicateur de moyen mesurant le recours aux pesticides, le rendement est essentiellement un indicateur de résultat. Ceci fait que l'IFT dépend davantage, au minimum plus directement, des décisions et choix de l'agriculteur que le rendement dont le niveau est le résultat final d'un ensemble de déterminants endogènes (choix de l'objectif de rendement, pratiques agronomiques mises en œuvre, dont le recours aux pesticides, etc.) et exogènes (conditions météorologiques, pression fongique pour partie au moins influencée par ces conditions météorologiques, etc.). Par ailleurs, les deux indicateurs de pression sont également de nature différente au sens où le premier (index ABIO) est principalement influencé par des facteurs exogènes (conditions météorologiques), alors que la pression fongique (index BIO) dépend à la fois de facteurs exogènes (pluviométrie), et de facteurs endogènes (diversité des rotations, gestion des résidus de culture, etc.) qui peuvent influencer fortement le développement des maladies à l'échelle parcellaire et créer de fortes hétérogénéités locales. En d'autres termes, l'agriculteur peut plus facilement influencer, à la hausse comme à la baisse, le niveau de perturbations biotiques que le niveau de perturbations abiotiques. Ces observations impliquent, non pas qu'il n'est pas possible d'utiliser notre cadre d'analyse de la robustesse au couple IFT – pression maladies, mais que l'interprétation des résultats doit tenir compte des particularités de ce couple relativement au couple rendement – perturbations abiotiques.

En dépit de ces remarques et notamment du fait que l'IFT est un indicateur de moyen et non de résultat, nous avons considéré que l'IFT pouvait être considéré comme un indicateur de la performance environnementale permettant de mesurer le niveau de dépendance des systèmes de culture vis-à-vis des pesticides (Ecophyto, 2008) et, qu'à ce titre, il était donc pertinent de mesurer sa robustesse. L'objectif était d'analyser si certains systèmes de culture sont moins sensibles que d'autres vis-à-vis du niveau de pression maladies ou, dit autrement, si certains sont capables de

maintenir des IFT bas malgré des conditions biotiques défavorables. Une fois ces systèmes identifiés, nous avons cherché à caractériser leurs pratiques afin de mettre en évidence les leviers agronomiques permettant de réduire l'exposition et/ou la sensibilité de la culture de blé tendre à la pression des maladies. Nous revenons ci-dessous sur les principales étapes méthodologiques ayant permis la caractérisation des profils de robustesse face aux perturbations biotiques.

II.2.1. Indicateur de pression maladies

La première étape a été de construire un indicateur de pression maladies (indicateur BIO) qui permette d'estimer les niveaux d'expositions des parcelles de blé aux maladies fongiques. A cette fin, nous nous sommes basés sur les résultats d'essais variétés conduits par Semences-de-France entre 2011 et 2014. Ces essais assurent un cadre expérimental standardisé entre les parcelles non traitées et les parcelles traitées avec des fongicides. Un deuxième avantage est de prendre en compte l'impact combiné de toutes les maladies foliaires du blé présentes sur les parcelles étudiées, et pas uniquement l'impact d'une maladie en particulier. Comme pour l'indicateur ABIO, c'est l'écart de rendement entre une situation donnée (parcelles non traitées) et une situation optimale (parcelles traitées avec des fongicides) qui a été utilisée pour agréger sous la forme d'un seul indice l'ensemble des impacts des perturbations biotiques.

L'approche présente néanmoins des limites, au-delà de celles mentionnées sur la nature même de l'indicateur. La répartition spatiale des essais de Semences-de-France étant limitée à certains départements, nous avons dû utiliser une méthode d'interpolation spatiale afin d'estimer cet indicateur pour l'ensemble des exploitations du réseau FERMEcophyto. L'interpolation consiste à estimer la valeur de la pression maladies dans une zone donnée vide d'essais à partir des valeurs des essais localisés à proximité. Cette méthode est donc nécessairement sensible à la localisation des essais : plus une exploitation est éloignée de l'endroit où des essais ont été réalisés, plus la validité des résultats estimés à travers l'interpolation géographique peut être questionnée. Cette remarque fait notamment écho au fait que les niveaux de pression fongique peuvent présenter des degrés d'hétérogénéité importants en raison des caractéristiques locales et notamment de la densité des cultures à l'échelle d'un territoire donné (Colbach *et al.*, 1997).

En dépit de ces limites, l'utilisation de ces réseaux d'essais variétés s'est avérée être la meilleure option mobilisable pour estimer la variabilité spatiale et temporelle du niveau de pression maladies à l'échelle de la France. Il eut été possible de recourir à d'autres approches que nous avons écartées car présentant, selon nous, des inconvénients plus importants. Tout d'abord, nous avions pensé utiliser les données renseignées dans la base de données FERMEcophyto. Toutefois, la plus-value de ces données est malheureusement limitée par le caractère qualitatif et subjectif des informations récoltées, celles-ci étant directement fournies par les agriculteurs. En outre, cette information présente un autre biais, potentiellement important, lié au fait que l'intensité des pressions maladies renseignée par les agriculteurs est le résultat d'une combinaison de facteurs exogènes (conditions météorologiques ayant plus ou moins influencées le développement des maladies foliaires) et endogènes (pratiques agricoles ayant plus ou moins influencées le développement des maladies, matières actives utilisées, etc.). A ce titre, l'indicateur BIO issu des réseaux d'essais variétés présente l'avantage d'utiliser une source d'information homogène d'un département à l'autre. En effet, c'est la même variété Apache et le même type de conduite culturale qui ont été utilisés pour réaliser ces essais et quantifier les niveaux de pression maladies dans l'ensemble des régions.

Une autre source d'information possible pour évaluer la variabilité des niveaux de pression maladies est le réseau d'épidémio-surveillance déployé dans le cadre du plan Ecophyto et dont les résultats sont compilés sous la forme de Bulletins de Santé du Végétal (BSV). L'accès à ces données sous un format fiable et surtout harmonisé s'est avéré très difficile car le réseau est géré par des acteurs différents selon les régions. Il est important que ces données soient demain plus facilement accessibles et sous des formats harmonisés. La thèse de Lucie Michel (2016) portant sur la mise au point d'une démarche statistique permettant d'analyser les dynamiques épidémiologiques à partir des observations de terrain réalisées dans la région Champagne-Ardenne doit aider à progresser dans ce domaine.

II.2.2. Modèle économétrique d'évaluation de la robustesse face aux perturbations biotiques

La réponse des niveaux de protection fongicide (IFT) face à la variabilité des niveaux de pression maladies (indicateur BIO) a ensuite été analysée à travers un deuxième modèle économétrique (Equation 3). Ce dernier est appliqué à l'échelle de chaque système de culture à travers l'utilisation de variables indicatrices associées à l'indicateur BIO :

$$IFT_{ikt} = [a_k . D(k)] + [b_k . D(k)] . BIO_{it} \quad (3)$$

où IFT_{ikt} est l'indice de fréquence de traitement fongicides sur la parcelle i du système de culture k pendant l'année t, $D(k)$ est la variable indicatrice du système de culture k, et BIO_{it} est l'indicateur de pression fongique estimé sur la parcelle i et l'année t.

A l'instar du modèle développé pour évaluer la robustesse du rendement face aux perturbations abiotiques et compte de la relative modestie de la taille de notre échantillon, le modèle est à la fois simple (modèle linéaire) et parcimonieux (peu de variables explicatives). Le degré de sensibilité de l'IFT de chaque système de culture vis-à-vis du niveau de pression maladies est évalué à travers le coefficient b_k associé à l'indicateur BIO. Plus la valeur estimée de ce coefficient est grande, plus la réponse de l'IFT fongicides est positivement corrélée à une augmentation du niveau de pression maladies. Un tel système est sensible ou, de façon équivalente, peu robuste face aux perturbations biotiques. L'inverse est vrai si le coefficient estimé b_k est faible.

Les résultats d'estimation permettent de mettre en évidence un « effet système de culture », c'est à dire des différences de réaction d'une exploitation à l'autre. Ces différences étant importantes, ce résultat suggère que les agriculteurs ajustent le niveau de protection fongicide en fonction d'autres critères que le seul niveau de pression maladies.

Ces résultats d'estimation nous renvoient à une des limites de notre travail qui ne tient pas tant au cadre d'évaluation de la robustesse face aux perturbations biotiques en lui-même, mais au jeu de données mobilisé. En effet, les exploitations du réseau FERMEcophyto sont toutes engagées dans une démarche volontaire de réduction des utilisations de pesticides. Il est plus que probable que la poursuite de cet objectif ait influencé leurs pratiques et, par conséquent, leur intensité de recours aux fongicides. On notera néanmoins que le plan a été initié en 2009 et que par suite, son impact sur les niveaux de robustesse calculés entre 2011 et 2014 a été limité. En revanche, il est probable que cet impact ait été variable d'une exploitation à l'autre et même d'un groupe d'exploitation à un autre en fonction du profil de chaque agriculteur et des différences de dynamiques d'un groupe à l'autre.

Une seconde limite déjà évoquée est liée au fait que l'IFT représente un moyen de production qui est utilisé par l'agriculteur pour atteindre les objectifs qu'il s'est fixé. Cet IFT peut donc varier d'une année sur l'autre et même d'une parcelle à l'autre, en fonction d'autres variables que la pression maladies, par exemple l'objectif de rendement que se fixe l'agriculteur, l'introduction d'une nouvelle variété, etc. Cette relation entre le niveau de protection fongicide et la sécurisation des objectifs de rendements peut également être illustrée par le fait que le coefficient b_k associé à l'indicateur BIO dans l'équation (3) n'est pas toujours significativement différent de zéro. Cette non significativité suggère que pour certains agriculteurs au moins, la variabilité de l'IFT fongicides importe moins que le risque associé à une perte de rendement. Cette remarque renvoie à la problématique du risque et de l'aversion au risque des agriculteurs que nous aborderons plus en détail dans la troisième partie de cette discussion (cf. sous-partie III.3).

II.2.3. Relations entre les performances de rendement et d'utilisation de pesticides

Pour analyser les relations entre les performances de rendement et celles d'utilisation de fongicides, nous avons examiné si les systèmes de culture présentant des niveaux de sensibilité de l'IFT élevés vis-à-vis de la pression maladies, c'est-à-dire qui avaient tendance à protéger plus fortement leurs parcelles, présentaient, ou non, de meilleures performances en termes de rendement.

Pour cela, nous avons repris les résultats de la caractérisation des profils de robustesse de l'IFT fongicides établis dans le chapitre 6 (Q1 à Q4) et avons étudié les résultats de ces différents profils en termes de rendement moyen et de robustesse du rendement face aux perturbations abiotiques. Le Tableau 32 présente ces résultats calculés à l'échelle nationale.

La première ligne de ce tableau présente les niveaux de rendements moyens (en % de la moyenne régionalisée) des quatre classes de systèmes de culture répartis selon leur niveau d'IFT moyen et de sensibilité de l'IFT au niveau de pression fongique. On peut y lire que les systèmes de culture qui présentent des niveaux de protection fongicide moyens plus faibles que les autres présentent également des niveaux de rendement moyen plus faibles que le reste des systèmes de culture. Cela conforte les résultats des chapitres 4 et 5 qui montraient que le niveau de protection des cultures était un des facteurs explicatifs des différences de rendement moyen d'un système de culture à l'autre. Par ailleurs, ces résultats montrent que les systèmes de culture qui utilisent plus de fongicides en moyenne et qui modulent peu leur intensité (IFT fort et Sensibilité faible) présentent des rendements moyens significativement plus élevés que les autres systèmes de culture.

Tableau 32 : Rendement et robustesse du rendement face aux perturbations abiotiques pour les 120 systèmes de culture différenciés selon leur niveau de sensibilité de l'IFT face à l'indicateur de pression maladie

	Caractérisation des systèmes de culture selon l'utilisation de fongicides (cf. **chapitre 6**)			
	IFT faible et Sensibilité faible (n=34)	IFT faible et Sensibilité forte (n=27)	IFT fort et Sensibilité faible (n=26)	IFT fort et Sensibilité forte (n=33)
Rendement moyen (% moyenne régionalisée)	-5.0% (± 14%) **	-5.0% (± 13%) **	+3.0% (± 8%) *	+2.0% (± 13%) *NS*
Robustesse du rendement (écart à la moyenne régionalisée)	+3.1 (± 21.1) *NS*	-2.0 (± 26.6) *NS*	+4.5 (± 24.5) *NS*	-4.7 (± 23.0) *NS*

Note 1 : Les rendements de la ligne 2 sont exprimés relativement à la moyenne des rendements observés dans chaque zone géographique. Les valeurs entre parenthèses sont les écart-types empiriques.
Note 2 : Tests de Student de l'égalité des moyennes à zéro : ** P<0.05, * P<0.10, *NS* = Non Significatif

La seconde ligne du tableau présente les niveaux de robustesse du rendement (en termes d'écart absolu avec la moyenne régionalisée) des quatre classes de systèmes de culture répartis selon leur niveau d'IFT moyen et de sensibilité de l'IFT moyen au niveau de pression fongique. Cette fois-ci, on peut lire que les systèmes de culture qui présentent des niveaux d'IFT moyens et/ou des niveaux de sensibilité de l'IFT aux perturbations biotiques plus élevés ne présentent pas des niveaux de robustesse du rendement significativement différents des autres systèmes de culture.

D'après ces résultats, on peut conclure que le niveau moyen de protection fongicide a un impact sur le rendement moyen dans les parcelles de blé tendre. Par contre, on ne peut pas conclure à un impact de l'ajustement ou de la robustesse du niveau de protection fongicide sur le rendement du blé tendre et sur sa robustesse face aux perturbations abiotiques. Ces résultats indiquent donc que les agriculteurs définissent en premier lieu un objectif de rendement et qu'ils adaptent un programme de protection fongicide moyen en fonction de cet objectif de rendement. La variabilité temporelle et spatiale de l'IFT n'apparaît pas comme un facteur clé pour les agriculteurs. Nous discuterons dans la troisième partie de la discussion des leviers mobilisables pour inciter les agriculteurs à mieux adapter leurs utilisations de fongicides en fonction des niveaux réels de perturbations dans leurs parcelles.

II.3. Quelles perspectives pour ce cadre méthodologique de la robustesse ?

II.3.1. Elargir vers de nouveaux jeux de données

Dans cette thèse, nous avons comparé les performances de 145 exploitations agricoles françaises engagées, sur une base volontaire, dans le réseau de fermes DEPHY-ECOPHYTO et, plus spécifiquement, dans le sous-réseau des coopératives agricoles appelé communément FERMEcophyto -Réseau des Coopératives. Sur ces exploitations, plus de 2300 parcelles de blé tendre ont été enquêtées, ce qui représente un très large panel. La période 2011-2014 a présenté une gamme de situations climatiques et biotiques très contrastées et relativement représentatives de la

variabilité observée au cours de la période 1983-2014[7] (pour plus de détails, voir Annexe 7.2). Néanmoins, ce recul de quatre années, voire trois années sur certaines exploitations, peut sembler court dans l'optique d'analyser la variabilité temporelle des performances. Il sera intéressant de prolonger cette étude dans les années à venir pour voir en quoi l'allongement de la durée enquêtée modifie ou affine les résultats obtenus dans cette thèse.

En particulier, il sera intéressant d'étudier le comportement de ces mêmes exploitations par rapport au contexte climatique de l'année 2016. Les fortes pluies au mois de juin ont en effet entraîné de très grandes pertes de récolte dans la moitié nord de la France. En reprenant le cadre méthodologique proposé dans cette thèse, il sera intéressant d'étudier la variabilité des rendements à l'échelle locale afin de déterminer les caractéristiques agronomiques des systèmes de culture qui ont le mieux résister à ce contexte climatique très particulier. Ces données devraient être disponibles en fin d'année 2017.

Ces 145 exploitations du réseau FERMEcophyto présentaient l'avantage d'être bien réparties sur l'ensemble du territoire. Toutefois, ces exploitations ne représentent qu'un petit échantillon par rapport à la diversité des systèmes de production agricole présents sur le territoire français. Pour tester la représentativité de ce réseau de 145 exploitations agricoles par rapport à la moyenne des exploitations françaises, nous avons comparé quelques pratiques culturales observées dans ce réseau avec celles issues de l'enquête Pratiques Culturales réalisée en 2011 par le Ministère en charge de l'agriculture. Le Tableau 33 présente la comparaison de la dose totale d'azote moyenne, l'Indice de Fréquence de Traitement (IFT) moyen, la densité de semis moyenne et les rendements moyens observés entre les parcelles de blé tendre des exploitations du réseau FERMEcophyto et les résultats nationaux synthétisés par le Ministère en charge de l'agriculture (données Agreste, 2011).

Dans la grande majorité des régions, on peut observer que la conduite du blé tendre est plus intensive et que les rendements sont supérieurs dans les exploitations du réseau FERMEcophyto (+ 7 % d'azote par hectare en moyenne, + 10 % d'IFT en moyenne, + 12 % en termes de densité de semis en moyenne et +6% de rendement en moyenne), même si les différences ne sont pas significatives d'un point de vue statistique en raison du faible nombre de régions comparées. Cela rejoint l'hypothèse que les exploitations du réseau des coopératives présentent un profil et des objectifs de production légèrement plus élevés et donc une conduite plus intensive que le reste des exploitations agricoles françaises. Dans certaines régions, cela peut s'expliquer par la mise en place de contrats de collecte entre les agriculteurs et leurs coopératives, notamment sur des critères spécifiques comme un taux protéique élevé (région Midi-Pyrénées). Les niveaux de performance (en moyenne et en robustesse) observés dans les exploitations du réseau FERMEcophyto ne peuvent donc pas être interprétés comme parfaitement représentatifs de l'ensemble des exploitations agricoles françaises.

[7] L'amplitude des intensités de perturbations abiotiques mesurée avec le modèle de culture STICS dans chaque zone géographique confirme que les quatre années étudiées sont représentatives des conditions météorologiques observées sur une période beaucoup plus longue.

Tableau 33 : Comparaison des pratiques culturales et des rendements observés dans le réseau FERMEcophyto sur la période 2011-2014 et dans l'enquête Pratiques Culturales de 2011 (données Agreste)

Régions administratives	Dose d'azote totale (kg/ha)		IFT total		Densité de semis (kg/ha)		Rendement (t/ha)	
	FERME-cophyto	Agreste	FERME-cophyto	Agreste	FERME-cophyto	Agreste	FERME-cophyto	Agreste
Basse-Normandie	172	153	4.0	3.8	150	132	8.5	7.5
Bourgogne	181	147	3.2	3.3	151	160	8.0	6.4
Bretagne	119	115	3.1	3.6	143	143	8.0	7.3
Centre	161	156	5.0	3.2	167	137	7.3	7.1
Champagne-Ardenne	175	192	4.8	4.6	157	153	7.6	7.8
Ile de France	189	179	5.1	5.4	194	129	8.6	8.0
Limousin	128	*NA*	2.7	*NA*	227	*NA*	6.0	5.5
Lorraine	152	146	4.0	3.0	171	165	6.8	6.5
Midi-Pyrénées	194	143	2.6	2.3	147	147	5.6	5.4
Picardie	180	184	4.7	4.6	142	129	8.5	8.6
Poitou-Charentes	166	146	4.3	2.4	145	137	6.7	6.2
Rhones-Alpes	154	132	2.6	2.2	149	164	6.6	6.0

Au-delà des chiffres moyens, on peut également s'interroger sur la représentativité de cet échantillon FERMEcophyto en termes de diversité des exploitations agricoles. En effet, même si l'analyse de la diversité des itinéraires techniques et des successions culturales présentée dans le **chapitre 5** a permis de faire émerger des profils contrastés de systèmes de culture au sein de cet échantillon de 145 exploitations agricoles, la diversité intra- paraît faible comparée à celle de l'ensemble des exploitations françaises. En particulier, aucune exploitation en agriculture biologique n'était présente parmi les 145 exploitations étudiées. Pour mieux comprendre les déterminants de la robustesse du rendement et de la protection des cultures à l'échelle régionale, il serait intéressant d'appliquer le cadre méthodologique défini dans cette thèse sur un échantillon d'exploitations plus diversifié, intégrant une plus grande variabilité de systèmes de culture. Pour cela, les données de l'ensemble du réseau DEPHY, intégrant des groupes d'exploitations contrastés, pourraient être mobilisées. En particulier, il serait intéressant de comparer les résultats en termes de robustesse entre les exploitations du réseau des coopératives et celles du réseau des CIVAM ou des chambres d'agriculture. On pourrait ainsi étudier la question de la diversité des modèles de réflexion des agriculteurs, en particulier pour savoir si nos résultats sont dépendants du fait que les exploitations étudiées soient toutes dans des réseaux de coopératives.

A l'échelle régionale, il serait donc intéressant d'étudier les performances de robustesse dans des échantillons plus importants et comprenant des profils d'exploitations plus contrastés, comprenant par exemple des parcelles de blé tendre conduites en agriculture biologique, en agriculture de conservation, en protection intégrée, etc. Cela permettrait d'évaluer les performances respectives de ces exploitations et éventuellement de mettre en avant des différences de robustesse à l'échelle régionale, voire départementale (Jeuffroy *et al.*, 2013).

II.3.2. *Elargir vers de nouvelles cultures*

Le cadre d'évaluation de la robustesse défini et appliqué à l'échelle de la culture de blé tendre pourrait être aisément transposé à d'autres cultures. Parmi elles, il serait particulièrement intéressant de se pencher sur le cas du maïs, principale culture irriguée de France et dont les rendements sont fortement dépendants de la disponibilité de la ressource en eau. Il serait notamment intéressant de pouvoir comparer la robustesse du rendement du maïs avec celle d'une culture plus résistante vis-à-vis du stress hydrique comme le sorgho. Face à des conditions de sécheresse et en l'absence d'irrigation, les performances du sorgho peuvent en effet dépasser celle du maïs (Debaeke et Bertrand, 2008). Même si l'agriculteur n'est pas gagnant économiquement toutes les années, diversifier les systèmes de culture avec du sorgho peut permettre à l'agriculteur de diminuer l'exposition de ses parcelles aux risques de sécheresse estivale et ainsi éviter de lourdes pertes lors des années les plus sèches. Cette problématique pourrait également être traitée avec les données FERMEcophyto en développant un nouvel indicateur de perturbations abiotiques qui soit adapté aux cultures du maïs et du sorgho (par exemple en calculant l'intensité du déficit hydrique sur une période clé du développement de ces espèces). Un cadre économétrique mesurant le degré de sensibilité du rendement de ces deux cultures vis-à-vis de l'indicateur de perturbations abiotiques pourrait alors permettre de caractériser assez facilement les niveaux de robustesse du rendement pour ces deux cultures.

De la même manière, le cadre d'évaluation de la robustesse pourrait être particulièrement adapté aux cas des cultures de légumineuses à graines car les rendements de ces espèces, tout particulièrement le pois, peuvent varier très fortement d'une année sur l'autre du fait des aléas climatiques (Daryanto *et al.*, 2015). Néanmoins, et c'est un point crucial, les légumineuses à graines peuvent entraîner un gain de rendement pour la culture qui les suit, par exemple + 7,4 quintaux par hectare pour un blé tendre d'hiver implanté après un pois (Carrouée *et al.*, 2012), avec une variabilité de ce gain en fonction des contextes pédoclimatiques et des ajustements de fertilisation (de + 6 à + 12 quintaux). Ce point souligne la nécessité de dépasser l'échelle annuelle et mono-spécifique pour prendre en compte les performances des différentes espèces qui composent le système de culture. Cette dimension avait été partiellement prise en compte dans cette thèse en étudiant si les blés incorporés dans des rotations plus diversifiées, avec des précédents légumineuses notamment, présentaient ou non des rendements plus robustes face aux perturbations abiotiques. Nos résultats avaient montré que la diversification des rotations avait un impact positif sur le rendement moyen du blé tendre mais nous n'avions pas mis en évidence de bénéfices en termes de robustesse du rendement face aux perturbations abiotiques.

II.3.3. *Elargir vers de nouvelles performances*

Au-delà des performances productives (rendement) et environnementales (IFT), le cadre d'analyse de la robustesse proposé dans cette thèse pourrait également être adapté à d'autres types de performances. Parmi elles, il serait notamment intéressant de s'intéresser au cas de la robustesse des performances économiques des exploitations agricoles qui est un sujet important en raison de la volatilité des prix des produits et des intrants agricoles (Gohin *et al.*, 2012).

Pour éclairer cette problématique, nous nous sommes intéressés aux cas des performances économiques des exploitations du réseau FERMEcophyto à partir de leurs résultats obtenus sur les parcelles de blé tendre. Plus précisément, nous avons calculé pour les 2300 parcelles de blé tendre de notre échantillon la marge semi-nette obtenue et nous avons étudié la robustesse de cette

marge semi-nette face à la variabilité des perturbations abiotiques (indicateur ABIO). La marge semi-nette a été calculée en retranchant à la marge brute (rendement multiplié par le prix moyen du quintal de blé lors de l'année considérée) le coût des intrants (prix des semences, de la fumure et de la protection phytosanitaire issus des prix de référence indiqués par les coopératives agricoles). Le modèle économétrique développé pour évaluer la robustesse de la marge semi-nette face aux perturbations abiotiques à l'échelle du système de culture est donc le suivant :

$$M_{ikt} = c + [a_k . D(k)] . AWC_i + [b_k . D(k)] . ABIO_{it} \quad (4)$$

où M_{ikt} est la marge semi-nette calculée sur la parcelle i dans le système de culture k l'année t, $D(k)$ est la variable indicatrice correspondant au système de culture k, AWC_i est la réserve utile de la parcelle i et $ABIO_{it}$ est l'index de perturbations abiotiques mesuré sur la parcelle i l'année t.

Nous reprenons donc dans ce modèle défini par l'équation (4) les principaux paramètres utilisés pour caractériser la robustesse du rendement face aux perturbations abiotiques (équation (1)). Nous avons conservé la variable mesurant la réserve utile des sols comme variable explicative dans ce modèle afin de discriminer les différences de robustesse en « purgeant » les effets induis par les caractéristiques des sols. De la sorte, nous pouvons considérer que le coefficient b_k de cette équation (4) représente le degré de sensibilité de la marge semi-nette pour chaque système de culture vis-à-vis des perturbations abiotiques, indépendamment des caractéristiques pédologiques. Les résultats économétriques obtenus indiquent à nouveau un « effet système de culture », c'est-à-dire que les exploitations du réseau FERMEcophyto ne présentent pas toutes les mêmes niveaux de sensibilité de la marge semi-nette face aux perturbations abiotiques.

Comme pour les performances rendement et IFT, nous avons ensuite pu caractériser à l'échelle de chaque zone géographique différents profils de robustesse et différents profils de performance moyenne pour la marge semi-nette, notamment des systèmes de culture à marge semi-nette élevée en conditions abiotiques moyenne et à sensibilité faible face aux perturbations abiotiques (Q1), des systèmes de culture à marge semi-nette élevée en conditions abiotiques moyenne et à sensibilité élevée face aux des perturbations abiotiques (Q2), des systèmes de culture à marge semi-nette faible en conditions abiotiques moyenne et à sensibilité faible face aux des perturbations abiotiques (Q3), et des systèmes de culture à marge semi-nette faible en conditions abiotiques moyenne et à sensibilité forte face aux des perturbations abiotiques (Q4).

A partir de ces quatre profils de robustesse, nous avons ensuite étudié la relation entre les performances rendement et marge semi-nette afin d'étudier en quoi les performances économiques sont influencées par celles relatives au rendement du blé tendre. Nous avons donc étudié, pour les quatre profils définis ci-dessus, les résultats moyens en termes de rendement et de robustesse du rendement face aux perturbations abiotiques (Tableau 34).

Tableau 34 : Rendement et robustesse du rendement face aux perturbations parmi les systèmes de culture différenciés selon leur niveau de performance économique

	Caractérisation des systèmes de culture selon la marge semi-nette			
	Marge élevée – Faible sensibilité (Q1)	Marge élevée – Forte sensibilité (Q2)	Marge faible – Faible sensibilité (Q3)	Marge faible – Forte sensibilité (Q4)
Rendement moyen (% moyenne régionalisée)	+6% (± 9%) ***	+9% (± 9%) ***	-7% (± 15%) ***	-8% (± 10%) ***
Robustesse du rendement (écart à la moyenne régionalisée)	+13.4 (± 19.8) ***	-10.0 (± 22.0) ***	+16.3 (± 18.3) ***	-14.6 (± 18.5) ***

Note : Les rendements de la ligne 2 sont exprimés relativement à la moyenne des rendements observés dans chaque zone géographique. Les valeurs entre parenthèses sont les écart-types empiriques. Test de Student's de l'égalité des moyennes à zéro : *** significatif à P<0.01.

Les résultats obtenus montrent que les deux performances rendement et marge semi-nette sont fortement corrélées l'une à l'autre. En effet, les systèmes de culture caractérisés par une marge semi-nette élevée et une faible sensibilité aux perturbations abiotiques (Q1) présentent également un niveau de rendement plus élevé (+6% par rapport à la moyenne régionalisée) et un niveau de sensibilité plus faible (coefficient b_k supérieur de 13.4 points par rapport à la moyenne régionalisée). Les trois autres profils de robustesse de la marge semi-nette présentent les mêmes résultats : ceux qui ont des rendements élevés présentent des marges semi-nettes plus élevées et inversement, et ceux qui présentent des niveaux de robustesse du rendement élevés présentent des niveaux de robustesse de la marge semi-nette plus élevés.

Ce cadre d'évaluation de la robustesse des performances économiques pourrait être enrichi en intégrant d'autres cultures que seulement le blé tendre. En effet, il serait intéressant d'étudier la robustesse de la marge semi-nette à l'échelle du système de culture dans son intégralité. Par ailleurs, ce modèle pourrait être enrichi en mesurant la robustesse des performances économiques face à un indicateur mesurant la variabilité du contexte économique (indicateur de perturbations économiques).

II.3.4. Elargir vers de nouvelles sources de perturbations

Parmi les perturbations auxquelles les exploitations agricoles sont les plus exposées, la volatilité des prix des produits agricoles est un élément d'instabilité pour les agriculteurs et l'une des principales sources de risque pour la sécurité alimentaire mondiale (Huchet-Bourdon, 2011). A mesure que les marchés nationaux deviennent de plus en plus interconnectés, les chocs économiques sur les marchés mondiaux peuvent se répercuter plus rapidement qu'auparavant (Sternberg, 2012). Les variations de prix peuvent donc avoir des incidences importantes, tant sur l'affectation des ressources que sur les performances agricoles.

Evaluer la robustesse des performances des exploitations face aux risques de prix est donc une priorité. Le cadre d'analyse de la robustesse proposé dans cette thèse pourrait aider à cela en permettant d'évaluer la sensibilité des performances économiques (par exemple la marge nette des exploitations) face à un indicateur de perturbations économiques. Ce dernier pourrait être calculé sous la forme du rapport entre le prix de vente du blé et un indice du prix des différents intrants (Mosnier *et al.*, 2009). De la sorte, on pourrait mettre en évidence les années où les prix de vente

pour les agriculteurs ont été bas et combinés à des prix des intrants élevés. La robustesse des performances économiques pourrait alors être étudiée de la même manière que nous l'avons fait pour le cas du rendement face aux perturbations abiotiques.

III. Apports opérationnels de la thèse

Au-delà des aspects méthodologiques discutés précédemment, cette thèse a également permis de faire ressortir plusieurs éléments opérationnels pour améliorer la robustesse des performances du blé tendre face à la variabilité des conditions climatiques et biotiques. Ces apports sont à resituer dans un vaste corpus de recherche autour de l'adaptation des systèmes agricoles face à un environnement changeant. Nombreuses sont les études (Brisson *et al.*, 2010 ; Darnhofer *et al.*, 2010 ; IPCC, 2014), y compris la nôtre (chapitre 3), qui soulignent l'augmentation de la variabilité des conditions météorologiques et les risques que cela fait peser sur la sécurité alimentaire mondiale. Ces éléments ont progressivement amené la mise à l'agenda politique de la question de la robustesse des systèmes agricoles sous la terminologie d'une agriculture « climato-intelligente » (Climate-smart agriculture), c'est-à-dire capable d'améliorer i) la durabilité de la productivité agricole, ii) de renforcer la capacité d'adaptation des systèmes agricoles et iii) d'augmenter la séquestration de carbone dans les sols.

Dans cette thèse, les leviers pour améliorer la robustesse du rendement et la protection fongicide sur le blé ont été principalement recherchés au niveau des pratiques agronomiques, afin de déterminer les facteurs d'amélioration à disposition des agriculteurs. Nous avons notamment démontré le potentiel des pratiques dites de flexibilité, déployées à l'échelle d'une culture comme le blé tendre, afin de réduire l'exposition et les impacts des perturbations abiotiques sur le rendement. Ceci constitue un élément fort de cette thèse car même si les bénéfices associés à ces pratiques avaient déjà été pressentis à travers l'utilisation de modèles (Rodriguez *et al.*, 2011; Casadebaig *et al.*, 2014), aucune étude basée sur des résultats obtenus en conditions agricoles n'avait encore démontré leur influence positive sur la robustesse du rendement. Ces résultats sont d'autant plus remarquables qu'ils ont été obtenus sur une période relativement courte (seulement quatre années d'observation) et à une échelle très large (145 exploitations réparties sur presque l'ensemble du territoire métropolitain).

Ces résultats sont également originaux car ils mettent en évidence l'importance des éléments agronomiques et systémiques pour augmenter la robustesse des performances. En général, les études s'intéressant à ces questions s'attachaient surtout à identifier des déterminants socio-économiques (Simelton *et al.*, 2009) ou encore génétiques (Mickelbart *et al.*, 2015) permettant d'expliquer le potentiel de tel ou tel facteur pour limiter les impacts de la variabilité du climat. Grâce au cadre d'analyse déployé dans cette thèse et permettant de purger les résultats d'une grande partie des effets non-agronomiques (conditions pédologiques et climatiques prises en compte dans l'indicateur ABIO), nous avons pu mettre en évidence que c'est la combinaison de plusieurs facteurs agronomiques et leur souplesse de mise en place dans le temps et dans l'espace qui peuvent aider à réduire la sensibilité des systèmes de culture face aux perturbations abiotiques.

Ces résultats signifient donc qu'il va falloir introduire plus de flexibilité dans les systèmes de culture afin de mieux prévenir l'impact des perturbations sur les performances agricoles et premier

lieu, l'impact du changement climatique. Cela aura évidemment des implications, d'abord pour les agriculteurs en termes de complexité du système à gérer, mais également pour les autres acteurs du monde agricole qui devront intégrer ces nouveaux objectifs et ces nouveaux savoirs dans leurs activités.

III.1. Intégrer plus de flexibilité dans les systèmes agricoles

Les résultats des chapitres 4 et 5 indiquent que ce sont les systèmes qui intègrent le plus de diversité et de flexibilité dans la conduite de leurs parcelles de blé tendre qui sont les plus robustes face aux perturbations abiotiques. Ces résultats signifient donc que l'adaptation des systèmes agricoles face au changement climatique passera notamment par une plus grande complexité des systèmes de culture.

Ces résultats s'inscrivent dans un vaste champ de littérature. La notion de flexibilité a fait notamment l'objet d'une littérature très abondante dans le domaine des sciences de gestion et de l'économie industrielle (Dreyer and Grønhaug, 2004). En agriculture, l'intérêt de la flexibilité a surtout été mis en avant en élevage (Dedieu *et al.*, 2008), comme un levier central pour améliorer la capacité de ces systèmes à faire face aux aléas et à se pérenniser en situation d'incertitude (Ingrand *et al.*, 2009). En fonction de l'objectif recherché, plusieurs types de flexibilité ont été distingués dans cette littérature, comme i) la flexibilité stratégique (capacité à faire évoluer la structure d'une organisation pour répondre aux perturbations de l'environnement), ii) la flexibilité du travail (capacité à ajuster les compétences), et iii) la flexibilité opérationnelle (capacité à modifier les méthodes de production pour répondre à des variations difficiles à anticiper).

La flexibilité, telle que définie dans les Chapitres 4 et 5 de cette thèse, fait surtout référence à la flexibilité opérationnelle : modulation des dates de semis et des gammes de précocité des variétés de manière cohérente afin d'étaler au mieux les risques sur l'ensemble de la sole de blé. Cette flexibilité se caractérise notamment par une plus grande souplesse dans la conduite des cultures, notamment à travers une plus grande hétérogénéité spatiale des pratiques afin de réduire l'exposition aux perturbations. Sur la campagne 2015/2016, au cours de laquelle les rendements de blé tendre à l'échelle de la France ont chuté de plus de 30 % en raison de l'excès de pluie et de la prolifération des maladies en juin, plusieurs acteurs[8] ont rapporté que les parcelles les moins impactées étaient celles qui présentaient des hétérogénéités de développement au sein des plants de blé. Cela confirme bien que les agriculteurs qui intègrent plus de flexibilité dans leur conduite du blé sont moins impactés que d'autres par la variabilité des conditions climatiques.

D'autres études avaient mises en avant le rôle potentiel de la flexibilité mais en l'intégrant généralement dans une approche plus large. Rodriguez *et al.* (2011), par exemple, définissaient l'idée de plasticité des exploitations agricoles en intégrant à la fois des éléments de flexibilité mais aussi d'opportunisme (capacité des agriculteurs à répondre et profiter des opportunités associées à un environnement hautement variable) dans la conduite des cultures. Dans des environnements soumis à de fortes variations interannuelles, comme en Australie par exemple, ces comportements opportunistes ont été mis en place par les agriculteurs afin de profiter des conditions de semis ou de récolte favorables lorsqu'elles se présentent (Sadras *et al.*, 2003). En mettant en commun leurs matériels et parfois leurs terres, ces agriculteurs développent une flexibilité que l'on pourrait qualifier de relationnelle (Chia, 2008) et qui se traduit par un meilleur pilotage des opérations de culture. Par exemple, l'utilisation de capteurs hydriques et leur suivi dans le temps permet de

[8] Discussions rapportées par des ingénieurs régionaux d'ARVALIS Institut-du-végétal

connaître au jour le jour la réserve en eau dans les sols et donc de décider très rapidement de l'opportunité de semer ou non.

Une autre illustration de la flexibilité relationnelle serait la capacité des agriculteurs d'un territoire donné à réfléchir en commun le choix des espèces et des variétés utilisées afin de réduire l'homogénéité spatiale et par conséquent l'exposition à des risques abiotiques et biotiques sur leur territoire. Un exemple est la construction de mosaïques des résistances à l'échelle paysagère permettant de réduire les infestations de bioagresseurs en évitant d'associer spatialement et temporellement les inoculum avec des cultures ou des variétés sensibles. Parmi les applications les plus connues, l'expérience de la mise en place de mélanges variétaux de riz en Chine pour lutter contre une maladie fongique provoquée par *Magnaporthe grisea* est particulièrement illustrative (Zhu *et al.*, 2000). Cette expérience, à laquelle les agriculteurs locaux avaient pleinement participé, s'était traduite par une adaptation des pratiques locales et par l'introduction de mélanges de variétés d'un rang sur l'autre. Le résultat, une quasi disparition de la maladie sur la variété sensible, avait tellement séduit les agriculteurs que le mélange de variétés est ensuite devenu une pratique courante dans la région, couvrant jusqu'à deux millions d'hectares d'une zone dans laquelle une variété sensible à la maladie mais commercialement intéressante était cultivée sans aucun apport fongicide et sans dommage significatif lié au parasite (Lannou *et al.*, 2013).

On le comprend bien, l'intégration de plus de flexibilité dans les systèmes agricoles se fera de manière active par les agriculteurs. La flexibilité n'est pas une propriété « innée » d'un système : elle se construit, s'entretient, se « cultive » et a un coût (Chia and Marchesnay, 2008). Cette flexibilité devra notamment s'articuler avec les contraintes techniques liées aux opérations culturales. L'intégration de plus de flexibilité questionne donc sur les modes d'apprentissage individuels et collectifs, ainsi que sur les outils nécessaires pour aider les agriculteurs à mieux planifier le calendrier des opérations culturales et simplifier la prise de décisions.

III.2. Conséquences pour les acteurs du développement agricole

Améliorer l'adaptation des systèmes agricoles à un environnement de plus en plus incertain nécessitera l'implication de nombreux acteurs du développement agricole. Parmi eux, les sélectionneurs devront assurer la mise à disposition d'options variétales contrastées mais complémentaires, permettant aux agriculteurs de choisir des panels de variétés qui soit cohérent avec leurs systèmes de production et capables de répondre aux nombreuses sources de perturbations et d'opportunités auxquels ils sont exposés. Dans le contexte français, cela suppose la conservation de la diversité variétale aujourd'hui disponible et une augmentation de l'offre auprès des agriculteurs. Plusieurs études ont montré la nécessité de concevoir de nouvelles variétés qui soient plus précoces à l'épiaison mais stables au stade épi 1cm en combinant une forte précocité intrinsèque et une forte exigence en termes de photopériode (Gate *et al.*, 2008; Brisson and Levrault, 2010). Cela permettra d'éviter les fortes températures au cours du remplissage et de proposer aux agriculteurs des variétés avec des rythmes de développement innovants.

Plus largement, l'adaptation des systèmes agricoles à un environnement changeant passera par des innovations techniques et l'appropriation par les agriculteurs de nouveaux outils. Il est notamment clair que l'augmentation de la variabilité interannuelle du climat renforce l'intérêt des outils d'aide à la décision capables de mieux anticiper les besoins des plantes au niveau parcellaire. Par exemple, les aléas inhérents aux différents postes du bilan prévisionnel de l'azote (minéralisation,

coefficient d'utilisation, croissance du peuplement…) pourront être mieux prédits et anticipés grâce à des indicateurs de l'état des plantes relevés ou estimés par des modèles (Constant et al. 2015). Le déploiement de ces outils et de leurs services à large échelle est aujourd'hui permis grâce à des technologiques largement mobilisées et opérationnelles, comme par exemple la télédétection et les systèmes de transmission de l'information.

De même, les réseaux d'observations développés à l'échelon local, comme par exemple le réseau d'épidémiosurveillance qui publie les Bulletins de Santé du Végétal (BSV), constituent un atout précieux pour décrire la présence des bioagresseurs, les niveaux de risque associés ainsi que les phénomènes émergents ou en expansion (Michel *et al.*, 2016). Les résultats présentés dans le chapitre 6 relatifs à la variabilité de l'IFT fongicides montrent que les agriculteurs n'adaptent encore que très peu le niveau de protection fongicide au niveau de pression des maladies. Pour améliorer cette situation, plusieurs pistes sont à privilégier. Tout d'abord, il faut améliorer la précision de ces données et, par conséquent, la confiance qu'en ont les agriculteurs. Pour cela, les observations du BSV pourront être précisées et rendues plus prédictives en étant couplées avec l'utilisation de modèles de développement des cultures et des bioagresseurs (Launay *et al.*, 2014 ; Aubertot et Robin, 2013). Cela permettra de proposer des préconisations plus précises aux agriculteurs en termes de choix tactiques de protection et ainsi diminuer leur aversion aux risques.

III.3. Autres mécanismes de gestion du risque en agriculture

Sur ce dernier point, il apparaît essentiel de poursuivre les recherches pour mieux appréhender et quantifier l'aversion aux risques des agriculteurs, notamment face aux risques biotiques. En effet, ce que nous avons appelé une faible robustesse face aux perturbations biotiques (**chapitre 6**) est en réalité un mécanisme de gestion du risque de production de la part des agriculteurs dans l'objectif de sécuriser leurs rendements. Le rôle de l'aversion aux risques sur l'utilisation des pesticides a donné lieu à de nombreux travaux en économétrie (voir Carpentier, 2010 pour une analyse critique). Il a par exemple été montré que les pesticides permettent de réduire l'aléa de récolte mais que les agriculteurs tendent à utiliser les pesticides au-delà du niveau garantissant le profit espéré maximum. Carpentier (1995) montrait par exemple que l'attitude risquophobe des agriculteurs expliquait environ 10 à 15 % des utilisations de pesticides des producteurs français de grandes cultures au début des années 1990. Cette notion d'aversion au risque doit donc être mieux étudiée et quantifiée de la part des chercheurs afin d'être intégrée dans les modèles et les outils d'aide à la décision qui permettront aux agriculteurs de sécuriser leurs rendements tout en réduisant les niveaux de protection des cultures.

Mais au-delà des outils et des pratiques d'évitement et d'atténuation des risques que les agriculteurs peuvent mettre en œuvre sur leurs exploitations pour réduire les fluctuations des rendements, des revenus ou des utilisations de pesticides, d'autres stratégies de couverture des risques existent et devront être encouragées à l'avenir. Parmi elles, les stratégies privées d'assurance et de mutualisation des risques à l'échelle des coopératives agricoles représentent un outil intéressant pour lisser les baisses de marge lorsque les prix baissent. L'épargne de précaution, qui consiste à abonder un fonds en période favorable et à prélever sur le fonds en période défavorable, est une option de sécurisation des revenus face aux risques de prix (Cordier *et al.*, 2008). A ces mécanismes d'assurance privés, peuvent aussi s'ajouter des stratégies budgétaires publiques qui permettent de réduire l'impact des risques de marché. A ce titre, les aides dites contra-cycliques pourraient être mises en place dans la PAC-post 2020 pour imposer qu'une partie

des subventions touchées par les agriculteurs soit bloquée sur une épargne de précaution obligatoire et utilisée lorsque le différentiel entre le prix d'objectif public et le prix de marché est jugé trop important (OCDE, 2010).

IV. Atouts et limites associés aux dispositifs de recherche participative

Cette thèse a mobilisé un corpus de données inédit par sa taille et son origine avec plus de 2300 parcelles de blé tendre enquêtées sur 145 exploitations agricoles et quatre années. Ces exploitations font partis d'un plus large réseau appelé FERMEcophyto, lui-même intégré dans un dispositif de recherche participative appelé DEPHY-FERME.

IV.1. Le réseau participatif DEPHY-FERME

La recherche participative se définit par la « production de connaissances scientifiques auxquelles des acteurs non-scientifiques-professionnels — qu'il s'agisse d'individus ou de groupes — participent de façon active et délibérée » (Houllier, 2015). Le réseau DEPHY-FERME répond donc à cette définition à travers l'implication directe de nombreux agriculteurs et la mise en commun de connaissances nouvelles. Ces nouveaux dispositifs de recherche participative se démarquent des dispositifs de recherche habituels par plusieurs caractéristiques, dont la diversité des milieux et des systèmes de production couverts qui est inédite.

Ensuite, ces nouveaux dispositifs ouvrent des espaces nouveaux pour l'innovation car ils offrent l'opportunité aux agriculteurs de s'associer pour partager et échanger leurs expériences. En cela, le développement de ces nouveaux dispositifs participatifs représente un changement en matière de schéma d'innovation : l'approche classique en conception réglée (Le Masson *et al.*, 2006), s'appuyant sur des objectifs prédéfinis et des méthodes standardisées, est remplacée ou du moins complétée par une approche participative dont les connaissances et les apprentissages ne sont pas connus au démarrage du projet (Vall *et al.*, 2016). L'innovation en expérimentation collective permet de combiner les processus d'exploration scientifique, de développement et de transfert alors que ces trois processus sont généralement segmentés temporellement dans le cadre habituel de l'innovation par conception réglée.

L'approche participative développée dans le cadre du réseau DEPHY-FERME permet également d'encourager le changement chez les agriculteurs en s'appuyant sur des boucles d'apprentissages progressifs. Au fur et à mesure des échanges avec d'autres agriculteurs et des expérimentations menés, le producteur met au point son nouveau système en même temps qu'il apprend à le piloter, se convainc de son intérêt, et réorganise son travail et ses moyens de production (Darnhofer *et al.*, 2010). Ces dispositifs d'innovation incrémentale (ou « pas à pas ») contrastent avec les dispositifs d'expérimentation dits « de novo » qui permettent de tester des innovations « de rupture » par rapport à l'existant. A ce titre, le dispositif DEPHY-EXPE remplit cette fonction à travers des innovations plus ambitieuses et systémiques que le dispositif DEPHY-FERME en termes de réduction de l'usage des pesticides. On peut néanmoins s'interroger sur l'articulation entre ces deux types de dispositifs étant donné qu'ils sont menés simultanément dans le cadre du projet ECOPHYTO. De manière pragmatique, on peut voir dans les dispositifs de recherche participative comme DEPHY-

FERME un moyen de détecter des pratiques ou des systèmes innovants de manière plus rapide et précise qu'auparavant. Ces nouvelles pratiques peuvent alors être testées et combinées avec d'autres dans le cadre des approches « systèmes » développées dans DEPHY-EXPE afin de valider la plus-value de ces innovations observées sur le terrain et proposer des changements plus ambitieux.

IV.2. Un accélérateur de diffusion des pratiques ?

Les dispositifs de recherche participatifs tels que FERMEcophyto ont une autre spécificité, c'est qu'ils impliquent une communauté d'acteurs « en mouvement » et notamment des collectifs d'agriculteurs qui modifient leurs pratiques au fur et à mesure que le projet avance. On parle de « recherche-action » où les innovations sont construites par l'agriculteur en commun avec le groupe qui l'entoure (Goulet *et al.*, 2008 ; Huyghe, 2015). Ces collectifs d'agriculteurs, encadrés par un ingénieur réseau, permettent de créer des dynamiques de réflexion où sont échangées des connaissances et des expériences dans le but d'apporter à chaque individu des éléments de réflexion sur sa propre situation. Ces démarches ont prouvées leur efficacité pour accélérer l'apprentissage et les changements de pratiques vers la réduction d'intrants (Cerf *et al.*, 2008 ; Chantre *et al.*, 2014).

Dans le cadre du réseau des coopératives FERMEcophyto, l'implication des acteurs économiques peut également être un facteur d'accélération du changement avec la transformation du rôle du conseiller et la diffusion des savoirs auprès de l'ensemble des adhérents des coopératives. D'après la théorie des Rendements Croissants d'Adoption (Arthur, 1989), l'augmentation du nombre d'acteurs concernés et leur apprentissage par l'expérience permettent en effet d'accélérer la diffusion et l'adoption de nouvelles pratiques.

La diffusion des savoirs est un enjeu clé pour entretenir la motivation des agriculteurs et des ingénieurs-réseaux tout au long du projet. Cela repose notamment sur une meilleure valorisation des contributions individuelles et de la dimension collective. La faiblesse de la vitesse de diffusion des savoirs et des expériences avait été soulignée dans le rapport du député Potiers sur la modernisation du plan Ecophyto (Potier, 2014). L'augmentation du nombre d'agriculteurs impliqués dans ces dispositifs de recherche-action (le nombre de fermes DEPHY est passé de 180 à 2600 exploitations entre 2009 et 2016) devrait aider à créer plus d'interaction entre les groupes, toucher plus d'agriculteurs et identifier, dans les années à venir, de nouvelles pistes d'action pour améliorer la multi-performance des exploitations françaises et accélérer leur adoption par les agriculteurs.

IV.3. La recherche participative à l'ère du Big Data

Les données collectées dans ces dispositifs de recherche participative représentent une vraie mine d'informations pour les agronomes cherchant à étudier la variabilité spatiale et temporelle des pratiques et des performances agricoles. L'augmentation du nombre d'agriculteurs engagés, associé à l'utilisation croissante d'objets connectés, permettent aujourd'hui de collecter des volumes de données exponentiels. Ces nouvelles données contrastent avec les dispositifs d'expérimentation ou les réseaux d'observation classiques qui ne permettaient de couvrir qu'une faible diversité de milieux. Avec l'avènement du Big Data, de nouvelles opportunités mais aussi de nouveaux défis s'ouvrent donc pour les chercheurs (Howe *et al.*, 2008).

Les données acquises à travers ces nouveaux dispositifs se démarquent des données habituellement utilisées par les chercheurs par trois caractéristiques (on parle des trois V du Big Data) : leur

volume, leur vitesse et leur variété. Ces données représentent en effet des volumes massifs, elles sont accumulées à une fréquence très rapide et proviennent de sources très différentes (outils d'aide à la décision, enquêtes, objets connectés, etc.). Ces nouvelles caractéristiques imposent donc aux chercheurs de revoir leurs méthodes d'analyse (Babinet, 2016). L'une des questions centrales est de savoir si le volume massif des données collectées permet de compenser l'hétérogénéité et les marges d'erreur inhérentes à ces dispositifs participatifs. Au cours de cette thèse, il a fallu notamment s'adapter à l'hétérogénéité des données et à la variabilité de leur qualité en essayant de compléter les « trous », lorsque cela était nécessaire, par d'autres sources d'informations.

Par exemple, pour la caractérisation des profils pédologiques des 2300 parcelles de blé, nous ne disposions pas de critères scientifiques de classification des sols. Nous avons donc complété les informations disponibles (noms vernaculaires utilisés par les agriculteurs et leurs conseillers) grâce au croisement de ces données avec le référentiel régional des sols mis à disposition par ARVALIS-Institut du Végétal et qui utilisait la même terminologie que les agriculteurs. Le modèle de culture STICS a ainsi pu être paramétré mais pas de manière extrêmement précise. Une autre source d'hétérogénéité provenait du fait que les ingénieurs-réseaux chargés des enquêtes auprès des agriculteurs ne remplissaient pas tous les informations, même si un réel travail de standardisation a été entrepris sur l'autorité de la cellule d'animation nationale et au travers du système d'information Agrosyst. On disposait donc de données souvent hétérogènes et parfois lacunaires entre les différents groupes d'agriculteurs. Ces exemples illustrent bien que les outils scientifiques devront s'adapter à ces nouveaux dispositifs participatifs car ces derniers ne pourront pas intégrer le degré de standardisation que l'on retrouve dans les dispositifs expérimentaux auxquels les chercheurs sont habitués. A l'avenir, il faut espérer que l'adaptation des nouveaux outils numériques pour la gestion de données puisse faciliter et standardiser la récolte de ces informations auprès des agriculteurs.

Malgré les imperfections que l'on vient de souligner, les données issues de ces nouveaux dispositifs de recherche participative représentent des sources d'information uniques et incomparables pour les chercheurs. La grande diversité des milieux et des systèmes de production étudiés devrait permettre dans les prochaines années de mieux appréhender la variabilité des systèmes agricoles pour proposer des leviers d'action précis et adaptés à chaque contexte, en particulier sur la problématique de la robustesse. Ce jeu de données FERMEcophyto s'est, en effet, avéré particulièrement utile dans le cadre de cette thèse en mettant à notre disposition des informations sur une grande diversité d'acteurs et d'environnements de production.

V. Références

Arthur, B., 1989. Competing technologies, increasing returns and lock-in by historical events, Economic Journal 99, 116-131.

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, e73202.

Babinet, G., 2016. L'ère numérique, un nouvel âge de l'humanité. Le Passeur, 210 p.

Brisson, N., Gate, P., Gouache, D., Charmet, G., Oury, F.-X., Huard, F., 2010. Why are wheat yields stagnating in Europe? A comprehensive data analysis for France. Field Crops Research 119, 201-212.

Brisson, N., Levrault, F., 2010. Changement climatique, agriculture et forêt en France: simulations d'impacts sur les principales espèces.

Brisson, N., Ruget, F., Gate, P., Lorgeou, J., Nicoullaud, B., Tayot, X., Plenet, D., Jeuffroy, M.-H., Bouthier, A., Ripoche, D., 2002. STICS: a generic model for simulating crops and their water and nitrogen balances. II. Model validation for wheat and maize. Agronomie 22, 69-92.

Brown, B.J., Hanson, M.E., Liverman, D.M., Merideth Jr, R.W., 1987. Global sustainability: Toward definition. Environmental management 11, 713-719.

Carpentier, A., 1995. La gestion du risque phytosanitaire par les agriculteurs dans les systèmes de production intensive: une approche économétrique. Thèse universitaire soutenue à l'EHESS.

Carpentier, A., 2010. Economie de la production agricole et régulation de l'utilisation des pesticides Une synthèse critique de la littérature. In : Colloque SFER «La régulation des pesticides agricoles: enjeux, modalités et conséquences. Février 2010, 48 p.

Carrouée, B., Schneider, A., Flénet, F., Jeuffroy, M.-H., Nemecek, T., 2012. Introduction du pois protéagineux dans des rotations à base de céréales à paille et colza: impacts sur les performances économiques et environnementales. Innovations Agronomiques 25, 125-142.

Casadebaig, P., Trépos, R., Picheny, V., Langlade, N.B., Vincourt, P., Debaeke, P., 2014. Increased genetic diversity improves crop yield stability under climate variability: a computational study on sunflower. arXiv preprint arXiv:1403.2825.

Caubel, J., de Cortázar-Atauri, I.G., Launay, M., de Noblet-Ducoudré, N., Huard, F., Bertuzzi, P., Graux, A.-I., 2015. Broadening the scope for ecoclimatic indicators to assess crop climate suitability according to ecophysiological, technical and quality criteria. Agricultural and Forest Meteorology 207, 94-106.

Cerf, M., Omon, B., Chantre, E., Guillot, M., Le Bail, M., Lamine, C., Olry, P., 2010. Vers des systèmes économes en intrants: quelles trajectoires et quel accompagnement pour les producteurs en grandes cultures. Innovations agronomiques 8, 105-119.

Chantre, E., Le Bail, M., Cerf, M., 2014. Une diversité de configurations d'apprentissage en situation de travail pour réduire l'usage des engrais et pesticides agricoles. Activités 11 [en ligne], 11-2.

Chia, E., 2008. La flexibilité relationnelle: rôle des réseaux, groupements et associations d'éleveurs. Dedieu B., Chia E., Leclerc B., Moulin Ch., Tichit M.(Eds.), L'élevage en mouvement, Flexibilité et adaptation des exploitations d'herbivores, Ed. Quae, Paris, 137-144.

Chia, E., Marchesnay, M., 2008. Un regard des sciences de gestion sur la flexibilité. In: Dedieu, B., Chia, E., Leclerc, B., Moulin, C.-H., Tichit, M. (Eds.), L'élevage en mouvement: flexibilité et adaptations des exploitations d'herbivores. Editions Quae, pp. 23-36.

Cordier, J., Erhel, A., Pindard, A., Courleux, F., 2008. La gestion des risques en agriculture de la théorie à la mise en oeuvre: éléments de réflexion pour l'action publique. Notes et études économiques 30, 33-71.

Coucheney, E., Buis, S., Launay, M., Constantin, J., Mary, B., de Cortázar-Atauri, I.G., Ripoche, D., Beaudoin, N., Ruget, F., Andrianarisoa, K.S., 2015. Accuracy, robustness and behavior of the STICS soil–crop model for plant, water and nitrogen outputs: Evaluation over a wide range of agro-environmental conditions in France. Environmental Modelling & Software 64, 177-190.

Darnhofer, I., Bellon, S., Dedieu, B., Milestad, R., 2010. Adaptiveness to enhance the sustainability of farming systems. Agronomy for Sustainable Development 30, 545–555.

Daryanto, S., Wang, L., Jacinthe, P.-A., 2015. Global Synthesis of Drought Effects on Food Legume Production. PLOS ONE 10, e0127401.

de Goede, D.M., 2014. Understanding robustness as an image of sustainable agriculture. School of Social Sciences. Wageningen University, Wageningen (NL), p. 151.

Debaeke, P., Bertrand, M., 2008. Évaluation des impacts de la sécheresse sur le rendement des grandes cultures en France. Cahiers Agricultures 17, 437-443.

Dedieu, B., Moulin, C.-H., Chia, E., Leclerc, B., Tichit, M., 2008. L'élevage en mouvement: flexibilité et adaptation des exploitations d'herbivores. Éditions Quae.

Dreyer, B., Grønhaug, K., 2004. Uncertainty, flexibility, and sustained competitive advantage. Journal of Business Research 57, 484-494.

Gate, P., Blondlot, A., Gouache, D., Deudon, O., Vignier, L., 2008. Impacts du changement climatique sur la croissance et le développement du blé en France-Quelles solutions et quelles actions à développer? Oléagineux, Corps gras, Lipides 15, 332-336.

Goulet, F., Pervanchon, F., Conteau, C., Cerf, M., 2008. Les agriculteurs innovent par eux-mêmes pour leurs systèmes de culture. In : R. Reau et T. Doré (Eds.), Systèmes de culture innovants et durables. Dijon, Educagri éditions, 53-69.

Houllier, F., 2015. Les sciences participatives en France : état des lieux, bonnes pratiques et recommandations. Rapport élaboré à la demande des ministres en charge de l'Éducation nationale, de l'Enseignement supérieur et de la Recherche. Paris, 122 p.

Howe, D., Costanzo, M., Fey, P., Gojobori, T., Hannick, L., Hide, W., Twigger, S., 2008. Big data: The future of biocuration. Nature 455, 47-50.

Huchet-Bourdon, M., 2011. Agricultural Commodity Price Volatility. OECD Publishing.

Huyghe, M., 2015. Habiter les territoires ruraux-Comprendre les dynamiques spatiales et sociales à l'œuvre, évaluer les perspectives d'évolution des pratiques de mobilité des ménages. Université François Rabelais, Tours.

Ingrand, S., Astigarraga, L., Chia, E., David, C., Coquil, X., Fiorelli, J.-L., 2009. Développer les propriétés de flexibilité des systèmes de production agricole en situation d'incertitude: pour une durabilité qui dure… 13èmes Journées de la Recherche Cunicole, Le Mans (France).

Jeuffroy, M-H., Mignolet, C., Gauffreteau, A., Guichard, L., Makowski, D., Schott, C., Michel, L., 2013. Liens entre évolution du rendement et évolution des systèmes de culture en France. Séminaire ESPERA, Paris, 7 octobre 2013.

Lannou, C., Papaïx, J., Monod, H., Raboin, L., Goyeau, H., 2013. Gestion de la résistance aux maladies à l'échelle des territoires cultivés. Innovations Agronomiques 29, 33-44.

Launay, M., Caubel, J., Bourgeois, G., Huard, F., Garcia de Cortazar-Atauri, I., Bancal, M-O., Climatic indicators for crop infection risk: Application to climate change impacts on five major foliar fungal diseases in Northern France. Agriculture, Ecosystems and Environment 197, 147-158.

Lechenet, M., 2017. Etude de la faisabilité de la réduction de l'usage des pesticides en grandes cultures par l'analyse d'un réseau national de ferme de démonstration ECOPHYTO. Thèse réalisée à Dijon dans le cadre de l'École doctorale Environnements et Santé.

Le Masson, P., Weil, B., Hatchuel, A., 2006. Les processus d'innovation: Conception innovante et croissance des entreprises. Hermes Science Publications, 470 p.

Lipiec, J., Doussan, C., Nosalewicz, A., Kondracka, K., 2013. Effect of drought and heat stresses on plant growth and yield: a review. International Agrophysics 27, 463-477.

Michel, L., 2016. Mieux valoriser les réseaux d'épidémiosurveillance lors de l'élaboration du Bulletin de Santé du Végétal. Institut des Sciences et Industries du Vivant et de l'Environnement (AgroParisTech), Paris (France).

Michel, L., Brun, F., Piraux, F., Makowski, D., 2016. Estimating the incidence of Septoria leaf blotch in wheat crops from in-season field measurements. European Journal of Plant Pathology, 1-19.

Mickelbart, M.V., Hasegawa, P.M., Bailey-Serres, J., 2015. Genetic mechanisms of abiotic stress tolerance that translate to crop yield stability. Nature Reviews Genetics 16, 237-251.

Milestad, R., Dedieu, B., Darnhofer, I., Bellon, S., 2012. Farms and farmers facing change: The adaptive approach. In: Darnhofer, I., Gibbon, D., Dedieu, B. (Eds.), Farming Systems Research into the 21st Century: The New Dynamic. Springer Netherlands, pp. 365-385.

Mosnier, C., Agabriel, J., Lherm, M., Reynaud, A., 2009. A dynamic bio-economic model to simulate optimal adjustments of suckler cow farm management to production and market shocks in France. Agricultural Systems 102, 77-88.

OCDE, 2010. Gestion des risques dans l'agriculture : Une approche holistique, Éditions OCDE, Paris.

Ollion, E., 2015. Evaluation de la robustesse des vaches laitières: entre aptitudes biologiques des animaux et stratégies de conduite des éleveurs. INRA. Université Blaise Pascal-Clermont-Ferrand II, Clermont-Ferrand.

Potier, D., 2014. Pesticides et agro-écologie : les champs du possible. Rapport de Dominique Potier au Premier Ministre. Paris, 252 p.

Rizza, F., Badeck, F., Cattivelli, L., Lidestri, O., Di Fonzo, N., Stanca, A., 2004. Use of a water stress index to identify barley genotypes adapted to rainfed and irrigated conditions. Crop science 44, 2127-2137.

Rodriguez, D., Power, B., Cox, H., Crimp, S., Meinke, H., 2011. The intrinsic plasticity of farm businesses and their resilience to change. An Australian example. Field Crops Research 124, 157-170.

Sadras, V.c., Roget, D., Krause, M., 2003. Dynamic cropping strategies for risk management in dry-land farming systems. Agricultural systems 76, 929-948.

Simelton, E., Fraser, E.D.G., Termansen, M., Forster, P.M., Dougill, A.J., 2009. Typologies of crop-drought vulnerability: an empirical analysis of the socio-economic factors that influence the sensitivity and resilience to drought of three major food crops in China (1961–2001). Environmental Science & Policy 12, 438-452.

Sternberg, T., 2012. Chinese drought, bread and the Arab Spring. Applied Geography 34, 519-524.

Tendall, D., Joerin, J., Kopainsky, B., Edwards, P., Shreck, A., Le, Q., Kruetli, P., Grant, M., Six, J., 2015. Food system resilience: defining the concept. Global Food Security 6, 17-23.

Vall, E., Chia, E., Blanchard, M., Koutou, M., Coulibaly, K., Andrieu, N., 2016. La co-conception en partenariat de systèmes agricoles innovants. Cahiers Agricultures 25, 15001.

Zhu, Y., Chen, H., Fan, J., Wang, Y., Li, Y., Chen, J., Fan, J., Yang, S., Hu, L., Leung, H., 2000. Genetic diversity and disease control in rice. Nature 406, 718-722.

CONCLUSION

Face à des défis importants et à un contexte d'incertitude grandissant, les systèmes agricoles vont devoir être performants non seulement en conditions moyennes mais également face à des perturbations de nature et d'intensité variables. Ce contexte réinterroge les systèmes actuellement en place et notamment leur durabilité face à un environnement changeant. Cela s'est traduit par le développement et l'application d'un certain nombre de cadres conceptuels, dont celui de la robustesse. Dans les systèmes de grandes cultures, la robustesse permet de qualifier la capacité d'un système de culture, d'une culture, voire d'une variété, à maintenir ses performances malgré l'apparition de perturbations. Néanmoins, l'application de cadre conceptuel était jusqu'à présent peu développée par défaut de méthodes opérationnelles pour caractériser et mesurer cette robustesse. Dans cette thèse, un cadre d'évaluation de la robustesse a donc été développé et appliqué au cas de la production de blé tendre face à des perturbations abiotiques et biotiques. Les données parcellaires issues d'un large réseau de 145 exploitations agricoles faisant parti du réseau DEPHY-FERME ont été utilisées pour appliquer ce cadre d'évaluation.

Dans un premier temps, la robustesse du rendement du blé tendre a été étudiée face à la variabilité des conditions météorologiques. Un indicateur de perturbations abiotiques a été défini à l'échelle parcellaire avec le modèle de culture STICS afin de mesurer l'impact des facteurs abiotiques limitants sur le rendement du blé tendre. La robustesse du rendement de chaque exploitation a ensuite été étudiée en développant un modèle économétrique permettant de mesurer la sensibilité du rendement vis-à-vis des perturbations abiotiques. Les résultats montrent un « effet système de culture », indiquant que la robustesse du rendement varie fortement d'une exploitation à l'autre. Pour étudier les déterminants agronomiques de cette robustesse, deux critères ont été étudiés : d'une part, le niveau de rendement lorsque les conditions météorologiques sont moyennes, ou normales, et le niveau de sensibilité du rendement face aux perturbations abiotiques. Les 145 systèmes de culture ont ainsi été discriminés au regard de ces deux critères et leurs différences agronomiques ont été étudiées. Alors que les différences sont nombreuses pour expliquer les différences de rendement lorsque les conditions météorologiques sont moyennes, beaucoup moins de pratiques sont significativement discriminantes pour expliquer les différences de robustesse vis-à-vis des perturbations abiotiques. Néanmoins, la flexibilité de la conduite culturale du blé tendre, notamment la diversification spatiale des dates de semis et des gammes de précocité des variétés, ressort comme un levier central pour améliorer la robustesse du rendement. Une typologie des systèmes de culture à l'échelle de ce réseau de 145 exploitations agricoles a permis de confirmer ce résultat en montrant que les systèmes classés comme les plus flexibles étaient également ceux qui présentaient les niveaux de robustesse les plus intéressants.

Dans un second temps, ce cadre d'évaluation de la robustesse a également été appliqué sur le cas de la protection fongicide des parcelles de blé tendre afin d'étudier la robustesse des niveaux d'utilisation des fongicides face à la pression fongique. Un indicateur de perturbations biotiques mesurant les niveaux de pression fongique a donc été mesuré à l'échelle de chaque exploitation sur la période 2011-2014 et utilisé dans un second modèle de régression économétrique. Les systèmes de culture les robustes, c'est-à-dire ceux qui arrivaient à maintenir de bas niveaux de protection fongicide malgré l'augmentation des niveaux de pression maladies ont alors été identifiés et leurs pratiques comparées par rapport aux autres systèmes de culture. Là encore, de nombreuses pratiques agronomiques ont permis d'expliquer les différences d'utilisation de fongicides lorsque les conditions biotiques sont

moyennes, mais beaucoup moins de pratiques sont ressorties comme discriminantes pour expliquer les différences de robustesse au sein de cet échantillon d'exploitations agricoles.

Grâce aux avancées méthodologiques proposées, cette thèse ouvre de nouvelles perspectives de recherche et de développement pour contribuer à l'amélioration de la durabilité des systèmes de culture. Les outils et méthodes développés au cours de cette thèse ont l'ambition d'être mobilisés pour mieux évaluer la robustesse des performances et accompagner l'adaptation des systèmes agricoles face au changement climatique et faciliter les choix des agriculteurs, des conseillers et des décideurs. Au-delà de son application sur le blé tendre, ce cadre d'évaluation pourra également être appliqué à d'autres cultures et d'autres performances afin de pouvoir identifier les déterminants de la multi-performance des exploitations agricoles face à un environnement changeant.

Cette thèse représentait enfin une valorisation inédite des données issues d'un très large réseau participatif. Cette mise à la disposition de larges volumes de données réinterroge la place des chercheurs et celles des dispositifs expérimentaux standardisés. Même si de nombreux progrès restent à faire pour améliorer la mise à disposition et la qualité des données issues de ces dispositifs de recherche participative, leur complémentarité avec les dispositifs de recherche standardisés, permettront de produire des connaissances nouvelles et nécessaires pour mieux accompagner les agriculteurs. Ces dispositifs constituent, en outre, de formidables observatoires pour suivre les évolutions de l'environnement (climat, maladies) et des systèmes agricoles.

ANNEXES

Table des annexes

Chapitre 3

Annexe 3.1 : Tableau des corrélations des 15 indicateurs phénoclimatiques 204

Annexe 3.2 : Résultats de la classification ascendante hiérarchique 205

Annexe 3.3 : Tableau de corrélation de l'indicateur ABIO avec les 15 indicateurs phénoclimatiques 206

Annexe 3.4 : Ecarts mesurés entre les indicateurs phénoclimatiques calculés sur la période 2011-2014 et la moyenne calculée sur la période 1983-2014 dans les six environnements de culture de blé tendre 207

Chapitre 4

Annexe 4.1 : Liste et description des variables disponibles pour décrire les parcelles et les exploitations du réseau FERMEcophyto 209

Annexe 4.2 : Résultats économétriques 210

Annexe 4.3 : Résultats obtenus dans chaque zone géographique 216

Chapitre 5

Annexe 5.1 : Résultats de la typologie des systèmes de culture 223

Annexe 5.2 : Résultats "médians" obtenus pour les six profils de systèmes de culture 225

Annexe 5.3 : Résultats obtenus dans chaque zone géographique 226

Annexe 5.4 : Typologie complémentaire 238

Chapitre 6

Annexe 6.1 : Résultats économétriques 240

Discussion générale

Annexe 7.1 : Note sur les différents critères de quantification de la robustesse 246

Annexe 7.2 : Détail des conditions météorologiques au cours des quatre campagnes culturales de 2011 à 2014 253

Annexe 3.1 : Tableau des corrélations des 15 indicateurs phénoclimatiques

Indicators		Frost				Heat		Radiation deficit		Water excess		Water deficit				
		Emergence - ear at 1cm	Ear at 1cm - meiosis	Meiosis - flowering	Around meiosis	Meiosis - flowering	Flowering - ripening	Meiosis - flowering	Around meiosis	Sowing - emergence	Flowering - ripening	Sowing - emergence	Emergence - ear at 1cm	Ear at 1cm - meiosis	Meiosis - flowering	Flowering - ripening
Frost	Emergence - ear at 1cm	**1.00**														
	Ear at 1cm - meiosis	0.09	**1.00**													
	Meiosis - flowering	NA	0.07	**1.00**												
	Around meiosis	NA	0.06	0.84	**1.00**											
Heat	Meiosis - flowering	0.06	NA	-0.07	-0.05	**1.00**										
	Flowering - ripening	-0.04	-0.03	-0.05	-0.05	0.15	**1.00**									
Radiation deficit	Meiosis - flowering	NA	-0.07	-0.12	-0.09	0.13	0.22	**1.00**								
	Around meiosis	NA	-0.06	-0.12	-0.10	0.13	0.20	0.89	**1.00**							
Water excess	Sowing - emergence	-0.04	-0.04	-0.06	-0.05	-0.06	0.09	-0.05	-0.06	**1.00**						
	Flowering - ripening	-0.04	-0.02	-0.03	-0.03	0.09	NA	NA	NA	0.05	**1.00**					
Water deficit	Sowing - emergence	-0.14	NA	NA	NA	-0.03	0.03	-0.14	-0.12	0.04	0.31	**1.00**				
	Emergence - ear at 1cm	-0.20	0.04	0.24	0.20	-0.38	-0.23	-0.40	-0.33	-0.06	NA	0.20	**1.00**			
	Ear at 1cm - meiosis	-0.12	-0.06	0.04	0.03	NA	NA	-0.23	-0.13	NA	0.05	0.14	0.31	**1.00**		
	Meiosis - flowering	0.06	0.06	NA	NA	-0.07	-0.16	-0.94	-0.83	0.10	NA	0.13	0.29	0.20	**1.00**	
	Flowering - ripening	0.10	-0.03	NA	NA	-0.31	-0.03	-0.28	-0.26	0.30	NA	0.10	0.10	NA	0.28	**1.00**

Note : NA signifie que le coefficient de corrélation de Pearson n'est pas significatif à $P<0.05$

Annexe 3.2 : Résultats de la classification ascendante hiérarchique

Different methods of clustering were applied (complete-linkage clustering, single-linkage clustering, average linkage clustering and Ward method) and the best one was chosen on the basis of the agglomerative coefficient (Figure 3.2.1). Ward method showed the better clustering structure (agglomerative coefficient is equal to 0.95).

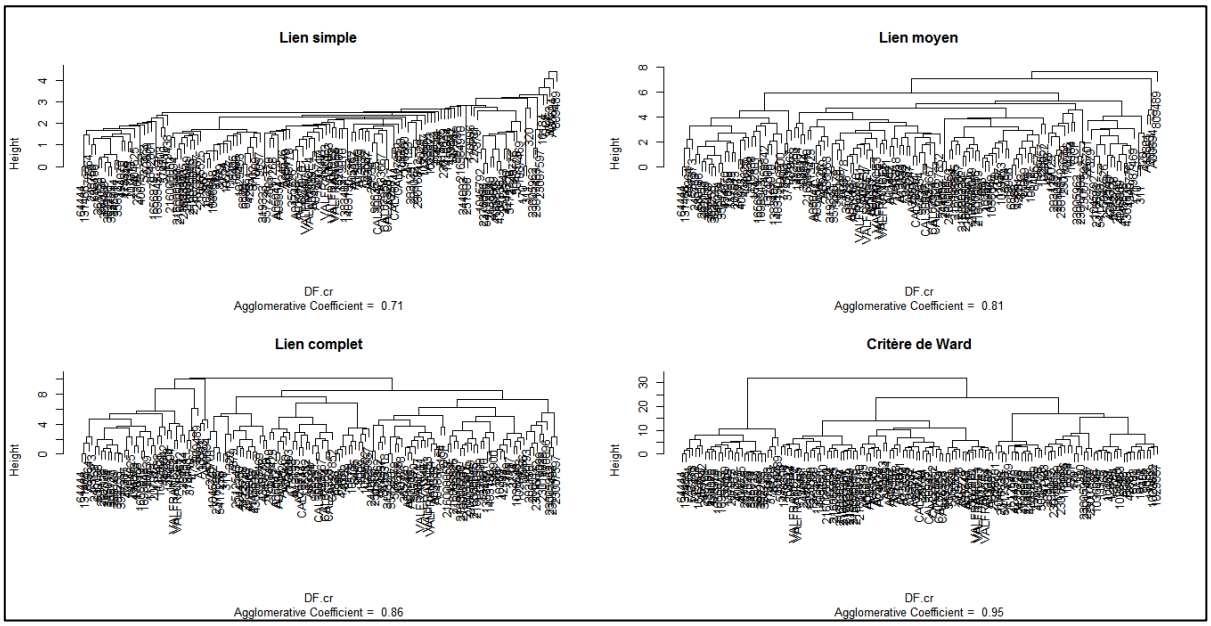


Figure 3.2.1 : Résultats des classifications ascendantes hiérarchiques réalisées avec les quatre méthodes d'agrégation : lien simple, moyen, complet et critère de Ward.

Cluster structure is usually presented in the form of dendrograms to illustrate the successive arrangement of the clusters produced by hierarchical clustering (Figure 3.2.2.). To define the optimal number of clusters, we used the Hubert-Levin C index, which measures, for each solution, the difference between maximal intra-cluster distance and minimal inter-cluster distance. Six was the optimal number of clusters according to this statistical indicator.

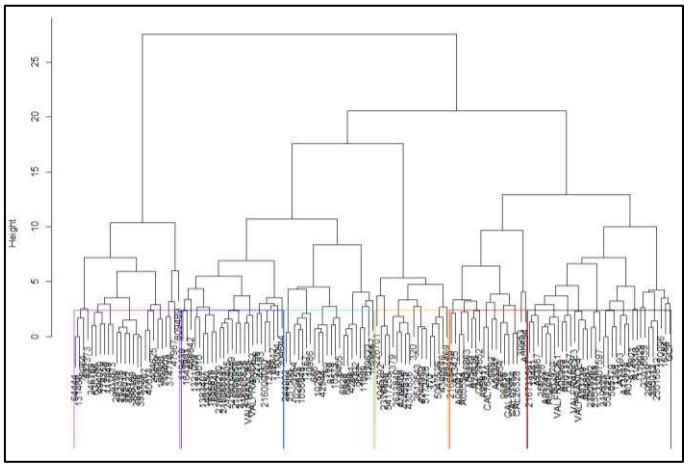


Figure 3.2.2 : Dendrogramme et segmentation en 6 classes. Les couleurs indiquent les différents regroupements.

Annexe 3.3 : Tableau de corrélation de l'indicateur ABIO avec les 15 indicateurs phénoclimatiques

Indicators		Pearson's correlation coefficients between ABIO index and the 15 agro-climatic indicators						
		Zone A	Zone B	Zone C	Zone D	Zone E	Zone F	France
Frost	Emergence - ear at 1cm	-0.06	NA	-0.14	-0.19	NA	-0.26	-0.12
	Ear at 1cm - meiosis	NA	-0.06	-0.14	NA	NA	0.08	0.03
	Meiosis - flowering	NA	NA	NA	-0.09	NA	NA	NA
	Around meiosis	NA	NA	NA	-0.06	NA	NA	NA
Heat	Meiosis - flowering	0.56	0.29	0.50	0.46	0.39	0.34	0.39
	Flowering - ripening	0.25	0.07	0.17	0.23	NA	NA	0.13
Radiation deficit	Meiosis - flowering	-0.18	NA	-0.35	-0.16	NA	-0.15	-0.13
	Around meiosis	-0.18	NA	-0.32	-0.18	NA	-0.21	-0.14
Water excess	Sowing - emergence	-0.26	-0.22	-0.24	-0.16	-0.14	-0.17	-0.18
	Flowering - ripening	0.19	NA	-0.10	NA	0.09	NA	NA
Water deficit	Sowing - emergence	-0.16	-0.22	NA	NA	-0.12	NA	-0.03
	Emergence - ear at 1cm	NA	-0.12	0.23	0.14	0.09	NA	0.11
	Ear at 1cm - meiosis	-0.11	0.30	0.18	0.08	0.32	0.20	0.16
	Meiosis - flowering	0.25	0.09	0.37	0.16	NA	0.21	0.18
	Flowering - ripening	0.25	0.15	0.29	0.23	0.17	0.27	0.20

Note : NA signifie que le coefficient de corrélation de Pearson n'est pas significatif à $P<0.05$

Annexe 3.4 : Ecarts mesurés entre les indicateurs phénoclimatiques calculés sur la période 2011-2014 et la moyenne calculée sur la période 1983-2014 dans les six environnements de culture de blé tendre

Indicators		Zone A				Zone B				Zone C			
		2011	2012	2013	2014	2011	2012	2013	2014	2011	2012	2013	2014
Water deficit	Sowing - emergence	4%	8%	-26%	-37%	-22%	1%	30%	-65%	23%	0%	-24%	-51%
	Emergence - ear at 1cm	20%	21%	-27%	-41%	36%	57%	-24%	-38%	43%	43%	1%	-35%
	Ear at 1cm - meiosis	41%	-14%	-25%	6%	20%	-2%	-6%	-5%	21%	-7%	14%	7%
	Meiosis - flowering	19%	-8%	9%	-7%	17%	1%	-4%	-15%	16%	7%	9%	-1%
	Flowering - ripening	-2%	-11%	8%	0%	7%	2%	-9%	0%	13%	-1%	6%	0%
Frost	Emergence - ear at 1cm	-20%	310%	-100%	-100%	-81%	472%	-100%	-100%	-61%	417%	-83%	-100%
	Ear at 1cm - meiosis	0%	0%	0%	0%	-100%	-100%	-100%	-100%	-100%	-100%	391%	-100%
	Meiosis - flowering	-100%	807%	250%	-54%	-100%	-100%	-37%	-100%	130%	101%	94%	-60%
	Around meiosis	-100%	545%	-100%	-100%	-100%	-100%	-59%	-100%	239%	-9%	74%	-66%
Water excess	Sowing - emergence	-39%	159%	-42%	63%	-100%	-100%	-100%	997%	-100%	-100%	126%	-100%
	Flowering - ripening	55%	83%	-30%	25%	49%	-38%	215%	-66%	-54%	40%	35%	153%
Heat	Meiosis - flowering	-100%	-100%	84%	-100%	-100%	-100%	-100%	-100%	-100%	-100%	-100%	-100%
	Flowering - ripening	-25%	-7%	27%	-14%	4%	20%	-33%	-26%	-6%	-41%	38%	-20%
Radiation deficit	Meiosis - flowering	14%	-4%	0%	-10%	19%	12%	-7%	-16%	14%	7%	5%	-2%
	Around meiosis	18%	-6%	3%	-9%	17%	18%	-5%	-23%	17%	6%	5%	-3%

Indicators		Zone D				Zone E				Zone F			
		2011	2012	2013	2014	2011	2012	2013	2014	2011	2012	2013	2014
Water deficit	Sowing - emergence	41%	46%	-40%	-57%	-68%	11%	-7%	-99%	26%	19%	-38%	-62%
	Emergence - ear at 1cm	25%	-16%	-5%	-43%	13%	10%	-37%	-113%	10%	-12%	-1%	-30%
	Ear at 1cm - meiosis	19%	-10%	-4%	-2%	20%	-5%	5%	-18%	15%	-18%	-22%	0%
	Meiosis - flowering	15%	1%	-9%	-15%	6%	-6%	-6%	-22%	12%	-3%	-5%	-10%
	Flowering - ripening	-1%	-17%	0%	-3%	-3%	-19%	-3%	-1%	-11%	-19%	3%	5%
Frost	Emergence - ear at 1cm	-68%	305%	-32%	-100%	-92%	53%	-100%	-100%	-31%	143%	-41%	-100%
	Ear at 1cm - meiosis	-100%	-100%	-100%	-100%	-100%	-100%	-100%	-100%	-100%	-100%	-100%	-64%
	Meiosis - flowering	-100%	301%	-66%	179%	-87%	-60%	-42%	-22%	-2%	413%	-100%	-51%
	Around meiosis	-100%	148%	-100%	276%	-100%	-52%	-57%	-20%	12%	301%	-100%	-90%
Water excess	Sowing - emergence	-100%	-100%	-100%	-100%	269%	-100%	-18%	-100%	-100%	-100%	276%	120%
	Flowering - ripening	-79%	62%	-5%	-2%	-74%	-62%	-58%	-88%	-44%	-53%	35%	50%
Heat	Meiosis - flowering	-100%	-100%	-100%	-100%	-100%	-100%	-100%	-100%	28%	-100%	1092%	-100%
	Flowering - ripening	-9%	-63%	65%	-40%	-19%	-61%	21%	-85%	-28%	-71%	75%	-15%
Radiation deficit	Meiosis - flowering	10%	-2%	-7%	-11%	2%	-7%	-11%	-16%	6%	-1%	4%	-10%
	Around meiosis	12%	-3%	-9%	-16%	-2%	-9%	-13%	-19%	9%	2%	0%	-5%

Annexe 4.1 : Liste et description des variables disponibles pour décrire les parcelles et les exploitations du réseau FERMEcophyto

Variable type	Variable	Description
Farm characteristics	Location	Geographic coordinates (longitude, latitude)
	Total area	Number of hectares
	Engaged area	Number of hectares engaged in the ECOPHYTO Plan
	Labor	Number of MWUs (Man Work Units) in the farm
	Production type	Production type(s) on the farm (arable crops, crop-livestock farming, viticulture, arboriculture, market gardening)
	Grassland area	Number of hectares of permanent grassland
	Farm equipment	List of equipment (seeder, harrow, spreader…), tractor characteristics, purchase of equipment as CUMAs (shared ownership) (yes/no)
Field characteristics	Location	Name of the locality where crops are cultivated
	Plot area	Number of hectares
	Harvested crop	Bread wheat (24%), temporary grassland (10%), rapeseed (8%), grain maize (7%), permanent grassland (6%), winter barley (6%), fodder maize (5%)…
	Soil characteristics	Texture of topsoil and subsoil (loamy/clayey/sandy/calcareous clay…), total depth and root depth (cm), proportion of pebbles (%), presence of drainpipes (yes/no)
Crop management practices	Variety	Name of the variety used
	Sowing characteristics	Sowing date and sowing density (kg/ha), sowing depth (cm)
	Irrigation	Yes/No
	Crop fertilization	Total amount of nitrogen, phosphorus, potassium and sulfur applied during the entire crop cycle (kg/ha), fertilizer characteristics (organic/mineral, solid/liquid…), number and timing of applications
	Soil tillage	Date of tillage operations and description of tillage equipment (deep plowing, stubble plowing, harrow...)
	Crop protection	Treatment Frequency Index of herbicides, fungicides, insecticides, molluscicides, growth regulators and seed treatments (per hectare)
Crop rotation practices	Crop before last	Species cultivated on the plot 2 years before
	Preceding crop	Species cultivated on the plot last year
	Crop rotation	Names and order of the species cultivated on the plot
	Cover crops	Type of cover crops, sowing date and destruction date
	Crop residue management	Previous crop residue management (buried/exported)
Agricultural performances	Productive performance	Target yield and final yield observed on the plot (q/ha)
	Economic performance	Gross margin (€/ha), operational costs (€/ha): seed costs, fertilizers costs, irrigation costs, crop protection costs...
	Energy performance	Energy consumption (MJ/ha)
	Social performance	Working time (h/ha)

Annexe 4.2 : Résultats économétriques

Summary table of the results of the regression model defined in Equation (1):

$$y_{ikt} = c + [a_k.D(k)].SWR_i + [b_k.D(k)].ABIO_{it}$$

where y_{ikt} is the wheat yield recorded on plot i in cropping system k in year t; SWR_i is the soil water resource of plot i, and $ABIO_{it}$ is the value of the index of abiotic perturbations calculated on plot i in year t.

Number of plots (i)	2327
Number of cropping systems (k)	145
Number of years (t)	4 [2011-2014]
Residual standard error	7.864
Degrees of freedom	2035
Multiple R-squared	0.7756
Adjusted R-squared	0.7435
F-statistic (p-value)	24.17 (p-value: < 2.2e-16)

Fisher test for testing the cropping system effect.

The Fisher test is a common method of testing the additional value of including new variables in a model. Here, we test the additional value of including dummy variables corresponding to the 145 cropping systems (parameters b_k). We thus compare the two following models:

- Model 1: $y_{ikt} = c + [a_k.D(k)].SWR_i + b.ABIO_{it}$
- Model 2: $y_{ikt} = c + [a_k.D(k)].SWR_i + [b_k.D(k)].ABIO_{it}$

The Fisher test approach consists to test the additional value of simultaneously including the 145 dummy variables in Model 2. Hypothesis testing is thus H0: $b_1 = b_2 = \ldots = b_{145}$ *versus* H1: at least one cropping system has a parameter b_k which is significantly different.

```
Analysis of Variance Table

Model 1: RDT ~ ABIO + RU:SDC
Model 2: RDT ~ ABIO:SDC + RU:SDC
  Res.Df    RSS  Df Sum of Sq     F    Pr(>F)
1   2180 169164
2   2035 125845 145     43319 4.831 < 2.2e-16 ***
---
Signif. codes:  0 ‘***’ 0.001 ‘**’ 0.01 ‘*’ 0.05 ‘.’ 0.1 ‘ ’ 1
```

The p-value of the Fisher test (Pr(>F) < 2.2 e-16) shows that at least one dummy variable associated with the ABIO index brings additional value for predicting wheat yield.

Estimated parameters associated with each cropping system. Values of parameters a_k and b_k are presented, as well as t-values corresponding to Student tests associated with the hypothesis H0: $a_k = 0$ *versus* H1: $a_k \neq 0$ (respectively H0: $b_k = 0$ *versus* H1: $b_k \neq 0$). The value of the common intercept *c* for the 145 cropping systems was 83.2 (p-value < 2.2e-16).

Test of significance: (***) significant at P<0.01, (**) significant at P<0.05, (*) significant at P<0.1

Geographical zone	Cropping system identifier	Parameter a_k	Parameter b_k
A	170	-0.13 (***)	12.1
A	311	-0.11	12.1
A	320	-0.31 (*)	4.4
A	226701	0.04	-18.3
A	244002	-0.06	-16.3 (*)
A	251500	-0.06	14.6
A	1045792	0.02	-108.0 (***)
A	1987469	-0.09 (**)	12.5
A	2376836	-0.13 (*)	-34.4
A	2512543	0.02	-29.9 (**)
A	2633840	-0.27 (***)	60.9 (***)
A	4145515	-0.07	-2.9
A	4189669	0	-32.2
A	4244350	-0.08 (*)	-11.4
A	4301836	-0.02	-37.6 (*)
A	5047526	0.03	-52.5
A	5172728	-0.39 (***)	76.7
A	5417258	0	-17.3
B	666	-0.08	-31.9 (***)
B	769	-0.09	-33.4 (***)
B	3754	-0.71 (***)	-4.4
B	6828	-0.1	-27.3 (**)
B	6988	-0.15 (***)	-24.6 (**)
B	7379	-0.05	-28.5 (*)
B	8179	-0.17 (***)	-31.5 (***)
B	8405	-0.07	-47 (***)
B	8702	-0.22 (***)	-11.2 (**)
B	9057	0.03	-39.2 (***)
B	10269	-0.3 (***)	-10.2
B	10572	-0.2 (***)	-15.6 (**)
B	10986	-0.6 (***)	-17.3 (*)

Geographical zone	Cropping system identifier	Parameter a_k	Parameter b_k
B	11009	-0.24 (***)	-21.8 (***)
B	11157	-0.16 (***)	-44.8 (***)
B	42881	-0.08 (**)	-13.6
B	42944	-0.16 (***)	-25.7 (***)
B	1029453	-0.28 (**)	8.5
B	1029557	-0.29 (**)	42.1
B	1029622	-0.14	-16.3
B	1036648	-0.18 (**)	-10.7
C	12394	-0.07	-44.7 (***)
C	16184	0.38	-75 (**)
C	41193	-0.23 (***)	-2.7
C	68612	-0.12 (*)	-56.5 (***)
C	119029	-0.28 (***)	4.2
C	170096	-0.09	-2.6
C	196900	-0.16 (***)	-24.1 (***)
C	203139	-0.14 (**)	-32.4 (**)
C	205012	-0.35 (***)	15.2
C	304644	-0.01	-33.4 (***)
C	809489	0.06	-51.2 (***)
C	23005962	-0.2 (***)	-21.8 (*)
C	23007597	-0.14 (***)	-25.4 (***)
C	23016639	-0.23 (***)	-12.3
C	23016812	-0.35 (***)	12.6
C	23017463	-0.13 (**)	-28 (**)
C	GCF	-0.21 (***)	-26.7 (***)
D	11268	0.01	-26.8 (***)
D	12441	-0.1 (**)	3.8
D	1321009	-0.08 (**)	30.3 (***)
D	1379010	0.03	29.3 (***)
D	1383407	0.07	8.5
D	1403150	-0.06 (*)	44.6 (***)
D	1410304	-0.01	-22.1 (*)
D	1642801	0.07 (***)	-36 (***)
D	1656879	-0.02	-6.3
D	1698543	-0.02	62.9 (***)
D	216000050	-0.21 (***)	10.1

Geographical zone	Cropping system identifier	Parameter a_k	Parameter b_k
D	216000230	-0.1 (**)	-1.2
D	216006956	0.08 (*)	-25.4 (***)
D	216033405	-0.09	-10.1
D	216034049	0	-26.6 (***)
D	216065381	-0.12	-13.6
D	216065525	-0.19 (***)	-9.6
D	216076019	-0.06	-13.9
D	216584910	-0.03	-18.2 (**)
D	216733567	-0.14 (*)	-7.8
D	VALFRANCE1	-0.03	-0.8
D	VALFRANCE2	0.06 (**)	-13.5
D	VALFRANCE3	0.02	-3
D	VALFRANCE4	0.02	7.8
D	VALFRANCE5	NA	-4.2
E	27207	-0.01	34.8 (***)
E	40073	-0.08 (***)	44.3 (***)
E	47967	-0.03	15.7
E	50839	-0.02	-12.1
E	64444	0.04	0.4
E	78964	-0.04	3.2
E	117049	0.14 (***)	-36.5 (***)
E	119438	0.12 (**)	-19.6 (*)
E	131466	0.04	11.6
E	178358	-0.06 (**)	-2.3
E	207013	-0.04	5.2
E	246769	0.02	-4.3
E	261158	0.03	-19
E	262036	-0.11 (*)	-29.4 (*)
E	345014	-0.03	10.1
E	356127	-0.08 (*)	-3.1
E	374710	0.06	11
E	381644	-0.03	-16.3
E	388109	-0.02	-12.2
E	392258	-0.02	26.5 (*)
E	393729	-0.02	-11.6
E	404625	0.08 (***)	-31.5 (**)

Geographical zone	Cropping system identifier	Parameter a_k	Parameter b_k
E	459842	-0.14 (*)	-24.2 (**)
E	494070	0.04	6.5
E	537373	0.11	-26.2
E	592758	0.01	-14.9
E	630186	0.04	-22
E	718403	0.08 (***)	-14.5 (**)
F	25534	-0.39 (**)	110 (*)
F	25682	-0.1	-17.9
F	30953	0.06	-35.4 (***)
F	96635	-0.09	14.3
F	319323	-0.02	17.1
F	325941	0.07	-13.6
F	355226	-0.24 (**)	95.2 (**)
F	502970	0.02	15.8
F	505179	-0.1	54.9 (**)
F	557220	0.06	-8.9
F	A00694	-0.1	-7.1
F	A00717	-0.02	-2.6
F	A01743	-0.27 (***)	37.6 (**)
F	A02916	-0.05	0.9
F	A03247	-0.12	0
F	A03339	-0.11	17.5
F	A03778	-0.09 (*)	4.3
F	A04887	0.12	-29.8
F	A05042	-0.21 (*)	20.5
F	A05362	0.05	-43.8 (***)
F	A05410	-0.6 (***)	14.5
F	A05554	0.19 (*)	-72.6 (***)
F	A13193	0.12	-59 (**)
F	A13425	-0.07	-5.3
F	A13635	-0.09	-34.4 (**)
F	A13801	0.64	-120
F	A14557	0.13	-40.1 (***)
F	A15318	-0.62 (***)	-15.6
F	A24626	-0.16 (*)	48.7 (*)
F	A25817	-0.22 (***)	57.6

Geographical zone	Cropping system identifier	Parameter a_k	Parameter b_k
F	A33667	0.08	-68.8 (***)
F	A36863	0.02	-32.6 (***)
F	CAL07954	-0.19 (***)	23.3
F	CAL26328	-0.14 (**)	9.5
F	CAL27852	-1.19 (*)	202
F	CAL30047	-0.04	-49.8 (***)
F	CAL76744	-0.45 (***)	61.7 (***)

Annexe 4.3 : Résultats obtenus dans chaque zone géographique

***Annexe 4.3.1** : Criteria used to characterize wheat yield robustness in each geographical zone.*

	Average AWC (mm)	Average ABIO index (1983-2014)	Yield in average weather conditions (t/ha)		Yield sensitivity to the ABIO index (estimated b_k parameter)	
			High Yield (above the median)	**Low Yield** (below the median)	**High Sensitivity** (below the median)	**Low Sensitivity** (above the median)
Zone A (n=17)	138	0.24	≥ 7.2	< 7.2	< -18.5	≥ -18.5
Zone B (n=20)	100	0.43	≥ 5.6	< 5.6	< -23.2	≥ -23.2
Zone C (n=17)	89	0.25	≥ 6.4	< 6.4	< -25.4	≥ -25.4
Zone D (n=22)	129	0.29	≥ 7.6	< 7.6	< -8.7	≥ -8.7
Zone E (n=28)	133	0.26	≥ 8.1	< 8.1	< -8.0	≥ -8.0
Zone F (n=30)	100	0.35	≥ 7.6	< 7.6	< -3.9	≥ -3.9

How to read this table? Take the example of zone A:

- The 17 cropping systems located in this geographical zone have on average deep soils (average AWC is equal to 138 mm).
- Over the period 1983-2014, the average value of the ABIO index was equal to 0.24. This means that on average weather conditions cause annually yield losses of about 24 %.
- Based on both the AWC and average ABIO index, wheat yield in average weather conditions was calculated for each cropping system. In this region A, the median value was 7.2 tons per hectare. The cropping systems for which the yield in average weather conditions was higher than or equal to 7.2 t/ha were classified in the "High yield" group. And the cropping systems for which wheat yield in average weather condition was lower than 7.2 t/ha were placed in the "Low yield" group.
- On the basis of the estimated parameters b_k of each cropping system associated with the index of abiotic perturbations in Equation (1), wheat yield sensitivity to abiotic perturbations was analyzed in zone A. The median value was -18.5. The cropping systems for which estimated coefficients b_k were lower than -18.5 were placed in the "High sensitivity" group whereas the cropping systems for which estimated coefficients b_k were higher than or equal to -18.5 were placed in the "Low sensitivity" group.

***Annexe 4.3.2** : Average agricultural practices in each geographical zone and each quadrant.*

ZONE A (n=17)					
	Agricultural practices	High yield and high sensitivity (Q1)	High yield and low sensitivity (Q2)	Low yield and high sensitivity (Q3)	Low yield and low sensitivity (Q4)
Management intensification practices (Group 1)	Total nitrogen rate	182 (± 2)	186 (± 19)	110 (± 33)	155 (± 13)
	Number of nitrogen applications	3.0 (± 0.0)	3.4 (± 0.5)	2.4 (± 0.4)	2.5 (± 0.4)
	Fungicide use intensity	1.6 (± 0.7)	1.3 (± 0.3)	0.8 (± 0.5)	1.2 (± 0.6)
	Total pesticide use intensity	3.6 (± 1.4)	2.6 (± 0.9)	1.5 (± 0.9)	2.6 (± 0.9)
	Sowing date	21-oct (± 2.2)	16-oct (± 3.9)	24-oct (± 1.7)	24-oct (± 9.0)
	Sowing density	150 (± 0)	152 (± 5)	150 (± 0)	155 (± 7)
	Variety earliness at joint stage	3.6 (± 0.1)	3.6 (± 0.4)	3.4 (± 1.4)	3.7 (± 0.2)
	Variety earliness at heading stage	7.0 (± 0.0)	6.9 (± 0.1)	6.7 (± 0.4)	6.8 (± 0.1)
	Variety disease resistance	4.6 (± 0.3)	5.2 (± 0.3)	5.2 (± 2.3)	4.6 (± 0.1)
	Soil tillage intensity	1.8 (± 0.2)	0.7 (± 0.9)	2.8 (± 1.8)	1.8 (± 0.5)
Rotation practices (Group 2)	Rotation diversity	2.9 (± 0.1)	2.8 (± 0.7)	2.7 (± 0.5)	4.4 (± 0.9)
	Frequency of summer crops	35% (± 11%)	70% (± 30%)	74% (± 20%)	59% (± 17%)
	Frequency of legume crops	7% (± 7%)	32% (± 30%)	23% (± 3%)	2% (± 2%)
	Frequency of wheat	47% (± 2%)	46% (± 2%)	44% (± 4%)	48% (± 5%)
	Frequency of cereals	75% (± 5%)	76% (± 18%)	78% (± 10%)	73% (± 5%)
	Frequency of temporary meadow	0% (± 0%)	6% (± 9%)	18% (± 12%)	0% (± 0%)
Flexibility practices (Group 3)	Flexibility of total nitrogen rate	11.1 (± 8.0)	11.1 (± 6.2)	8.0 (± 5.8)	6.6 (± 3.5)
	Flexibility of total pesticide use intensity	0.4 (± 0.0)	0.6 (± 0.3)	0.3 (± 0.2)	0.4 (± 0.2)
	Flexibility of sowing date	1.9 (± 0.5)	3.5 (± 0.9)	1.9 (± 1.7)	3.8 (± 2.3)
	Flexibility of sowing density	0.0 (± 0.0)	0.6 (± 1.1)	0.0 (± 0.0)	0.0 (± 0.0)
	Flexibility of variety earliness at joint stage	0.4 (± 0.2)	0.4 (± 0.2)	0.4 (± 0.3)	0.6 (± 0.4)
	Flexibility of variety earliness at heading stage	0.1 (± 0.1)	0.1 (± 0.1)	0.0 (± 0.0)	0.1 (± 0.1)
	Flexibility of variety disease resistance	0.6 (± 0.2)	0.8 (± 0.2)	0.4 (± 0.3)	0.7 (± 0.5)

ZONE B (n=20)					
	Agricultural practices	High yield and high sensitivity (Q1)	High yield and low sensitivity (Q2)	Low yield and high sensitivity (Q3)	Low yield and low sensitivity (Q4)
Management intensification practices (Group 1)	Total nitrogen rate	205 (± 20)	210 (± 14)	220 (± 19)	162 (± 62)
	Number of nitrogen applications	3.7 (± 0.4)	3.4 (± 0.4)	4.2 (± 0.3)	2.8 (± 1.3)
	Fungicide use intensity	1.3 (± 0.4)	1.6 (± 0.3)	0.9 (± 0.3)	0.8 (± 0.6)
	Total pesticide use intensity	3.3 (± 1.3)	3.4 (± 0.6)	2.6 (± 0.3)	2.2 (± 1.6)
	Sowing date	2-nov (± 6.9)	6-nov (± 9.5)	2-nov (± 4.2)	11-nov (± 16.8)
	Sowing density	130 (± 19)	149 (± 30)	155 (± 7)	153 (± 7)
	Variety earliness at joint stage	4.8 (± 0.3)	4.7 (± 0.3)	5.0 (± 0.0)	4.8 (± 0.3)
	Variety earliness at heading stage	7.6 (± 0.1)	7.6 (± 0.2)	7.6 (± 0.1)	7.6 (± 0.1)
	Variety disease resistance	5.7 (± 0.8)	5.3 (± 1.1)	5.0 (± 0.5)	5.8 (± 1.7)
	Soil tillage intensity	1.8 (± 0.6)	2.3 (± 0.8)	1.5 (± 0.1)	1.2 (± 0.8)
Rotation practices (Group 2)	Rotation diversity	2.1 (± 0.4)	3.2 (± 2.0)	2.0 (± 0.2)	2.1 (± 0.2)
	Frequency of summer crops	51% (± 21%)	70% (± 11%)	60% (± 28%)	63% (± 0%)
	Frequency of legume crops	7% (± 13%)	20% (± 35%)	1% (± 1%)	7% (± 8%)
	Frequency of wheat	62% (± 5%)	54% (± 10%)	57% (± 8%)	58% (± 2%)
	Frequency of cereals	73% (± 7%)	64% (± 16%)	68% (± 10%)	67% (± 4%)
	Frequency of temporary meadow	0% (± 0%)	0% (± 0%)	0% (± 0%)	2% (± 3%)
Flexibility practices (Group 3)	Flexibility of total nitrogen rate	2.5 (± 2.6)	3.2 (± 3.1)	3.2 (± 2.5)	5.9 (± 4.3)
	Flexibility of total pesticide use intensity	0.2 (± 0.2)	0.3 (± 0.1)	0.4 (± 0.1)	0.2 (± 0.2)
	Flexibility of sowing date	4.4 (± 4.5)	3.8 (± 4.4)	5.4 (± 2.2)	6.3 (± 6.0)
	Flexibility of sowing density	0.0 (± 0.0)	0.5 (± 0.9)	2.3 (± 1.6)	2.5 (± 3.8)
	Flexibility of variety earliness at joint stage	0.0 (± 0.0)	0.2 (± 0.2)	0.0 (± 0.0)	0.2 (± 0.3)
	Flexibility of variety earliness at heading stage	0.1 (± 0.1)	0.0 (± 0.0)	0.1 (± 0.1)	0.1 (± 0.1)
	Flexibility of variety disease resistance	0.6 (± 0.7)	0.5 (± 0.5)	1.3 (± 0.6)	0.7 (± 0.8)

ZONE C (n=17)					
	Agricultural practices	High yield and high sensitivity (Q1)	High yield and low sensitivity (Q2)	Low yield and high sensitivity (Q3)	Low yield and low sensitivity (Q4)
Management intensification practices (Group 1)	Total nitrogen rate	155 (± 24)	172 (± 4)	143(± 28)	114 (± 14)
	Number of nitrogen applications	2.6 (± 0.8)	3.2 (± 0.3)	2.5 (± 0.4)	2.2 (± 0.5)
	Fungicide use intensity	1.2 (± 0.3)	1.4 (± 0.2)	1.1 (± 0.4)	0.8 (± 0.2)
	Total pesticide use intensity	3.5 (± 1.4)	4.2 (± 1.1)	3.4 (± 1.4)	2.3 (± 0.4)
	Sowing date	24-oct (± 4.3)	23-oct (± 6.7)	20-oct (± 0.7)	24-oct (± 3.0)
	Sowing density	150 (± 2)	209 (± 64)	162 (± 12)	228 (± 43)
	Variety earliness at joint stage	3.7 (± 0.6)	3.6 (± 0.3)	2.9 (± 0.2)	3.5 (± 0.5)
	Variety earliness at heading stage	6.9 (± 0.1)	6.7 (± 0.3)	6.5 (± 0.1)	6.7 (± 0.3)
	Variety disease resistance	4.7 (± 1.2)	4.5 (± 1.0)	5.8 (± 0.8)	4.5 (± 1.9)
	Soil tillage intensity	2.5 (± 1.2)	1.9 (± 0.7)	2.1 (± 0.1)	2.2 (± 0.5)
Rotation practices (Group 2)	Rotation diversity	4.5 (± 1.2)	3.9 (± 0.8)	4.2 (± 1.2)	3.3 (± 0.5)
	Frequency of summer crops	56% (± 19%)	48% (± 17%)	53% (± 5%)	53% (± 23%)
	Frequency of legume crops	31% (± 23%)	37% (± 29%)	22% (± 11%)	28% (± 23%)
	Frequency of wheat	39% (± 4%)	42% (± 2%)	46% (± 3%)	39% (± 3%)
	Frequency of cereals	64% (± 11%)	64% (± 9%)	65% (± 8%)	67% (± 11%)
	Frequency of temporary meadow	20% (± 25%)	28% (± 34%)	36% (± 36%)	70% (± 31%)
Flexibility practices (Group 3)	Flexibility of total nitrogen rate	5.6 (± 4.9)	12.1 (± 7.5)	8.8 (± 3.1)	3.5 (± 4.3)
	Flexibility of total pesticide use intensity	0.4 (± 0.2)	0.5 (± 0.1)	0.4 (± 0.2)	0.2 (± 0.1)
	Flexibility of sowing date	2.2 (± 2.2)	5.7 (± 1.9)	2.0 (± 1.7)	1.4 (± 1.3)
	Flexibility of sowing density	2.1 (± 3.7)	8.9 (± 3.7)	2.3 (± 2.3)	0.4 (± 0.9)
	Flexibility of variety earliness at joint stage	0.3 (± 0.2)	0.3 (± 0.3)	0.6 (± 0.1)	0.2 (± 0.2)
	Flexibility of variety earliness at heading stage	0.2 (± 0.1)	0.4 (± 0.3)	0.3 (± 0.2)	0.2 (± 0.2)
	Flexibility of variety disease resistance	0.5 (± 0.3)	0.8 (± 0.7)	0.6 (± 0.3)	0.4 (± 0.4)

ZONE D (n=22)					
	Agricultural practices	High yield and high sensitivity (Q1)	High yield and low sensitivity (Q2)	Low yield and high sensitivity (Q3)	Low yield and low sensitivity (Q4)
Management intensification practices (Group 1)	Total nitrogen rate	184 (± 15)	183 (± 27)	168 (± 21)	153 (± 11)
	Number of nitrogen applications	3.1 (± 0.1)	3.2 (± 0.3)	2.9 (± 0.2)	2.9 (± 0.3)
	Fungicide use intensity	1.8 (± 0.4)	1.8 (± 0.4)	1.2 (± 0.2)	1.4(± 0.2)
	Total pesticide use intensity	5.3 (± 0.7)	4.8 (± 1.4)	4.5 (± 0.8)	5.5 (± 0.4)
	Sowing date	16-oct (± 5.5)	18-oct (± 2.7)	17-oct (± 5.3)	10-oct (± 6.5)
	Sowing density	171 (± 50)	163 (± 21)	159 (± 27)	169 (± 17)
	Variety earliness at joint stage	3.1 (± 0.5)	2.8 (± 0.3)	3.3 (± 0.8)	3.1 (± 0.7)
	Variety earliness at heading stage	6.5 (± 0.3)	6.2 (± 0.4)	6.7 (± 0.5)	6.6 (± 0.4)
	Variety disease resistance	4.8 (± 0.4)	4.7 (± 0.4)	5.0 (± 0.6)	5.2 (± 0.4)
	Soil tillage intensity	2.9 (± 0.9)	2.5 (± 1.1)	2.8 (± 0.9)	2.2 (± 0.8)
Rotation practices (Group 2)	Rotation diversity	3.0 (± 0.6)	4.3 (± 0.8)	2.7 (± 0.2)	3.2 (± 0.9)
	Frequency of summer crops	32% (± 31%)	49% (± 24%)	27% (± 10%)	18% (± 17%)
	Frequency of legume crops	7% (± 8%)	36% (± 22%)	11% (± 8%)	0% (± 0%)
	Frequency of wheat	46% (± 3%)	48% (± 10%)	50% (± 10%)	46% (± 10%)
	Frequency of cereals	70% (± 6%)	63% (± 6%)	75% (± 5%)	73% (± 6%)
	Frequency of temporary meadow	0% (± 0%)	2% (± 4%)	0% (± 0%)	0% (± 0%)
Flexibility practices (Group 3)	Flexibility of total nitrogen rate	9.3 (± 3.7)	14.5 (± 6.0)	11.0 (± 5.5)	8.5 (± 2.2)
	Flexibility of total pesticide use intensity	0.6 (± 0.3)	0.6 (± 0.3)	0.6 (± 0.2)	0.6 (± 0.2)
	Flexibility of sowing date	9.2 (± 3.2)	8.6 (± 3.2)	3.9 (± 2.4)	4.0 (± 0.8)
	Flexibility of sowing density	12.9 (± 9.9)	10.1 (± 5.8)	20.1 (± 11.3)	11.6 (± 10.2)
	Flexibility of variety earliness at joint stage	0.7 (± 0.3)	0.7 (± 0.3)	0.4 (± 0.2)	0.6 (± 0.4)
	Flexibility of variety earliness at heading stage	0.4 (± 0.1)	0.4 (± 0.1)	0.2 (± 0.1)	0.3 (± 0.1)
	Flexibility of variety disease resistance	0.9 (± 0.5)	1.1 (± 0.3)	0.9 (± 0.5)	0.9 (± 0.4)

ZONE E (n=28)					
	Agricultural practices	High yield and high sensitivity (Q1)	High yield and low sensitivity (Q2)	Low yield and high sensitivity (Q3)	Low yield and low sensitivity (Q4)
Management intensification practices (Group 1)	Total nitrogen rate	143 (± 47)	163 (± 28)	124 (± 38)	127 (± 12)
	Number of nitrogen applications	2.8 (± 0.8)	2.9 (± 0.5)	2.4 (± 0.6)	2.7 (± 0.4)
	Fungicide use intensity	1.5 (± 0.3)	1.7 (± 0.4)	1.4 (± 0.3)	1.3 (± 0.4)
	Total pesticide use intensity	3.5 (± 0.7)	4.0 (± 0.9)	3.2 (± 0.6)	3.0 (± 1.1)
	Sowing date	3-nov (± 13.7)	2-nov (± 7.2)	28-oct (± 6.1)	3-nov (± 6.8)
	Sowing density	146 (± 5)	147 (± 5)	144 (± 8)	147 (± 6)
	Variety earliness at joint stage	3.2 (± 0.4)	3.0 (± 0.7)	2.6 (± 1.2)	3.0 (± 0.7)
	Variety earliness at heading stage	6.1 (± 0.2)	6.2 (± 0.3)	5.9 (± 0.6)	6.2 (± 0.4)
	Variety disease resistance	5.5 (± 0.6)	5.6 (± 0.9)	5.7 (± 1.3)	5.7 (± 0.4)
	Soil tillage intensity	1.5 (± 1.5)	1.8 (± 1.5)	1.4 (± 1.5)	1.3 (± 0.9)
Rotation practices (Group 2)	Rotation diversity	2.3 (± 0.5)	2.6 (± 1.4)	2.4 (± 0.9)	2.6 (± 1.0)
	Frequency of summer crops	39% (± 21%)	32% (± 29%)	48% (± 31%)	49% (± 21%)
	Frequency of legume crops	13% (± 15%)	6% (± 9%)	1% (± 3%)	2% (± 2%)
	Frequency of wheat	64% (± 9%)	69% (± 10%)	64% (± 7%)	60% (± 9%)
	Frequency of cereals	84% (± 11%)	88% (± 11%)	94% (± 6%)	92% (± 13%)
	Frequency of temporary meadow	0% (± 0%)	1% (± 3%)	0% (± 0%)	5% (± 6%)
Flexibility practices (Group 3)	Flexibility of total nitrogen rate	14.8 (± 13.3)	11.4 (± 11.3)	13.2 (± 12.0)	17.7 (± 9.3)
	Flexibility of total pesticide use intensity	0.3 (± 0.2)	0.6 (± 0.3)	0.2 (± 0.2)	0.4 (± 0.3)
	Flexibility of sowing date	4.2 (± 5.6)	8.4 (± 9.0)	1.0 (± 1.2)	2.1 (± 2.8)
	Flexibility of sowing density	0.0 (± 0.0)	0.0 (± 0.0)	0.0 (± 0.0)	0.0 (± 0.0)
	Flexibility of variety earliness at joint stage	0.7 (± 0.2)	0.5 (± 0.5)	0.0 (± 0.1)	0.6 (± 0.3)
	Flexibility of variety earliness at heading stage	0.3 (± 0.2)	0.3 (± 0.2)	0.0 (± 0.1)	0.2 (± 0.2)
	Flexibility of variety disease resistance	0.9 (± 0.5)	1.1 (± 0.3)	0.1 (± 0.1)	0.7 (± 0.6)

ZONE F (n=30)					
	Agricultural practices	High yield and high sensitivity (Q1)	High yield and low sensitivity (Q2)	Low yield and high sensitivity (Q3)	Low yield and low sensitivity (Q4)
Management intensificatio n practices (Group 1)	Total nitrogen rate	175 (± 16)	161 (± 17)	157 (± 24)	154 (± 21)
	Number of nitrogen applications	3.3 (± 0.6)	3.5 (± 0.5)	3.4 (± 0.4)	2.6 (± 0.7)
	Fungicide use intensity	1.6 (± 0.7)	1.4 (± 0.4)	1.1 (± 0.4)	1.1 (± 0.4)
	Total pesticide use intensity	5.2 (± 1.0)	4.6 (± 0.8)	4.0 (± 1.5)	3.4 (± 0.7)
	Sowing date	30-sept (± 12.5)	9-oct (± 4.7)	6-oct (± 5.2)	9-oct (± 4.6)
	Sowing density	157 (± 13)	154 (± 17)	168 (± 25)	171 (± 13)
	Variety earliness at joint stage	2.3 (± 0.8)	2.6 (± 0.3)	2.6 (± 0.7)	2.4 (± 0.7)
	Variety earliness at heading stage	5.8 (± 0.5)	6.0 (± 0.4)	6.1 (± 0.3)	6.2 (± 0.4)
	Variety disease resistance	5.3 (± 0.9)	4.4 (± 1.0)	5.4 (± 0.7)	5.5 (± 0.8)
	Soil tillage intensity	3.4 (± 1.7)	3.9 (± 1.0)	2.6 (± 1.2)	4.1 (± 1.8)
Rotation practices (Group 2)	Rotation diversity	3.8 (± 1.3)	3.6 (± 1.0)	3.2 (± 1.1)	3.1 (± 0.8)
	Frequency of summer crops	36% (± 32%)	38% (± 30%)	28% (± 21%)	41% (± 32%)
	Frequency of legume crops	16% (± 16%)	16% (± 22%)	7% (± 12%)	1% (± 3%)
	Frequency of wheat	37% (± 4%)	42% (± 6%)	50% (± 11%)	47% (± 12%)
	Frequency of cereals	60% (± 13%)	60% (± 10%)	75% (± 9%)	82% (± 13%)
	Frequency of temporary meadow	14% (± 24%)	14% (± 20%)	5% (± 10%)	4% (± 5%)
Flexibility practices (Group 3)	Flexibility of total nitrogen rate	7.0 (± 6.7)	14.4 (± 18.7)	10.2 (± 6.3)	9.7 (± 7.6)
	Flexibility of total pesticide use intensity	0.4 (± 0.3)	0.7 (± 0.4)	0.4 (± 0.2)	0.4 (± 0.2)
	Flexibility of sowing date	1.7 (± 2.2)	4.4 (± 4.0)	4.6 (± 5.0)	4.0 (± 2.9)
	Flexibility of sowing density	0.4 (± 1.0)	4.1 (± 9.2)	0.5 (± 1.4)	4.2 (± 3.5)
	Flexibility of variety earliness at joint stage	0.3 (± 0.2)	0.4 (± 0.2)	0.4 (± 0.3)	0.3 (± 0.2)
	Flexibility of variety earliness at heading stage	0.1 (± 0.1)	0.2 (± 0.1)	0.2 (± 0.2)	0.2 (± 0.1)
	Flexibility of variety disease resistance	0.4 (± 0.3)	0.7 (± 0.4)	0.6 (± 0.5)	0.9 (± 0.4)

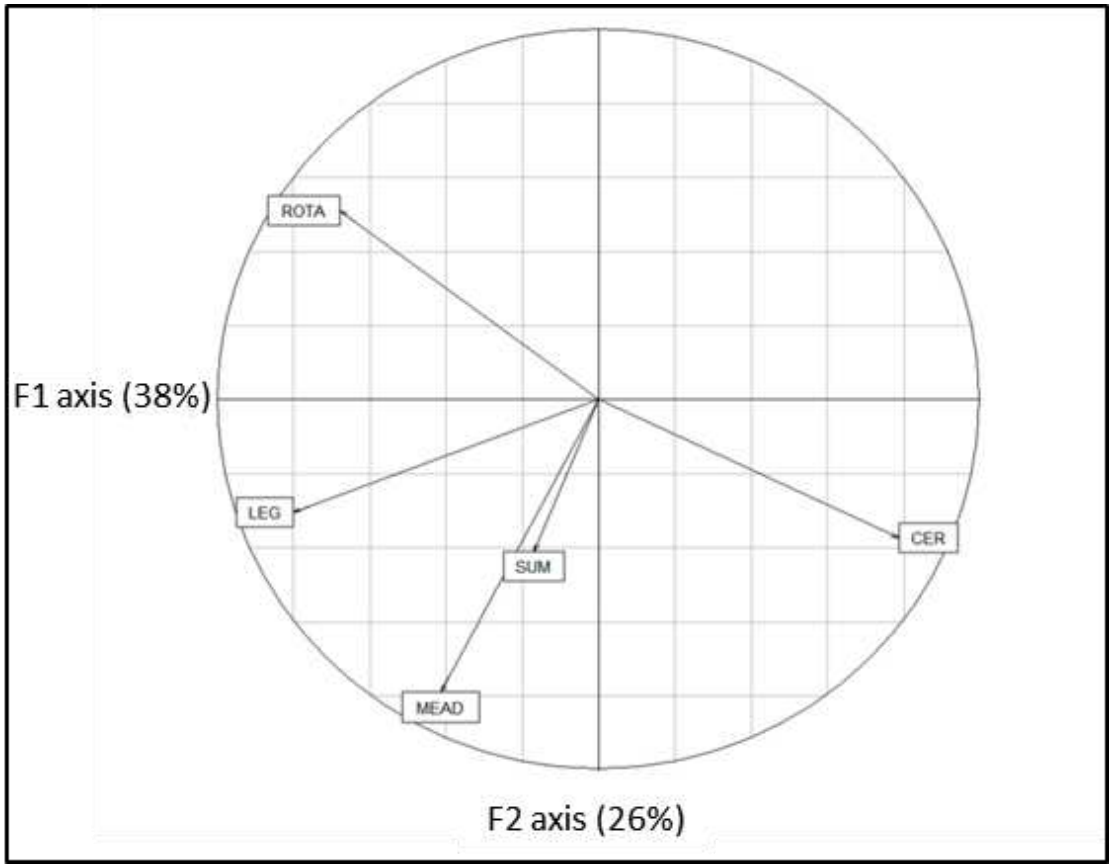
Annexe 5.1 : Résultats de la typologie des systèmes de culture

Crop rotation practices:

- Correlation coefficients between the first three principal components and five crop rotation practices studied:

	PC1	PC2	PC3
ROTA	-0.689	0.485	0.314
SUM	-0.205	-0.502	0.826
LEG	-0.803	-0.266	-0.231
CER	0.786	-0.376	0.097
MEAD	-0.405	-0.772	-0.307

- Projection of the five rotation variables in the plane of the first two factors of the PCA:

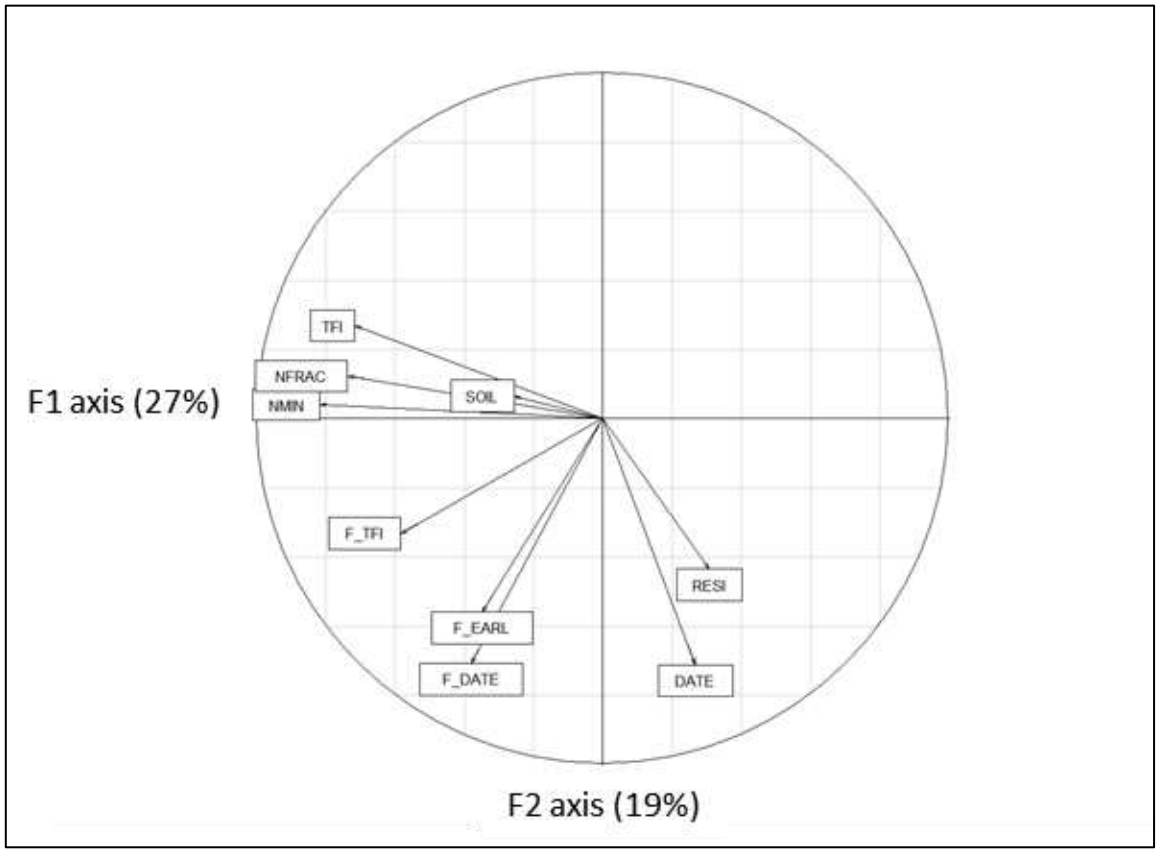


Wheat management practices:

- Correlation coefficients between the first five principal components and nine wheat management practices studied:

	PC1	PC2	PC3	PC4	PC5
NMIN	-0.817	0.041	-0.065	0.226	-0.345
NFRAC	-0.737	0.124	0.193	0.358	-0.211
TFI	-0.717	0.269	-0.008	0.011	0.162
DATE	0.268	-0.711	-0.352	0.042	-0.259
RESI	0.308	-0.435	0.266	0.682	0.226
SOIL	-0.257	0.066	-0.789	0.295	0.413
F_TFI	-0.584	-0.332	0.076	-0.437	0.347
F_DATE	-0.381	-0.708	-0.238	-0.161	-0.210
F_EARL	-0.348	-0.559	0.439	0.015	0.268

- Projection of the nine management variables in the plane of the first two factors of the PCA:



Annexe 5.2 : Résultats “médians” obtenus pour les six profils de systèmes de culture

- Wheat yields in normal weather conditions:

	Median	*vs* R1M1	*vs* R2M1	*vs* R1M2	*vs* R2M2	*vs* R1M3	*vs* R2M3
R1M1	+1 % NS						
R2M1	+3 % NS	NS					
R1M2	+2 % NS	NS	NS				
R2M2	+2 % NS	NS	NS	NS			
R1M3	**-5 % ****	NS	**R1M3<R2M1 (***)**	NS	**R1M3<R2M2 (***)**		
R2M3	**-8 % ****	**R2M3<R1M1 (**)**	**R2M3<R2M1 (***)**	**R2M3<R1M2 (***)**	**R2M3<R2M2 (***)**	NS	

- Wheat yield robustness to abiotic perturbations:

	Median	*vs* R1M1	*vs* R2M1	*vs* R1M2	*vs* R2M2	*vs* R1M3	*vs* R2M3
R1M1	- 3.5 NS						
R2M1	**- 7.0 ****	*NS*					
R1M2	+ 5.0 NS	*NS*	**R1M2 > R2M1 (**)**				
R2M2	+ 2.0 NS	**R2M2 > R1M1 (*)**	**R2M2 > R2M1 (***)**	*NS*			
R1M3	- 3.5 NS	*NS*	*NS*	*NS*	*NS*		
R2M3	+5.0 NS	*NS*	*NS*	*NS*	*NS*	*NS*	

Annexe 5.3 : Résultats obtenus dans chaque zone géographique

ZONE A

Practices	Rotation 1 & Management 1 (n = 0)	Rotation 2 & Management 1 (n = 1)	Rotation 1 & Management 2 (n = 6)	Rotation 2 & Management 2 (n = 6)	Rotation 1 & Management 3 (n = 2)	Rotation 2 & Management 3 (n = 2)
Yield performances						
Yield in average weather conditions		65 q/ha (-7%)	75 q/ha (+6%)	73 q/ha (+4%)	54 q/ha (-22%)	63 q/ha (-10%)
Estimated coefficient bk		+4.4 (+23)	-4.8 (+13.2)	+0.1 (+18.3)	-70.8 (-52.5)	-71.2 (-53.0)
Rotation practices						
Rotation diversity		3.6 (+16%)	2.8 (-8%)	3.7 (+19%)	2.6 (-14%)	-2.7 (-11%)
Frequency of summer crops		80% (+20%)	51% (-9%)	60% (0%)	88% (+28%)	71% (+11%)
Frequency of legume crops		0% (-13%)	4% (-9%)	21% (+8%)	10% (-3%)	26% (+13%)
Frequency of cereals		84% (+8%)	77% (+1%)	67% (-9%)	86% (+10%)	86% (+10%)
Frequency of temporary meadow		0% (-7%)	1% (-6%)	4% (-3%)	3% (-5%)	29% (+22%)

ZONE A

Practices	Rotation 1 & Management 1 (n = 0)	Rotation 2 & Management 1 (n = 1)	Rotation 1 & Management 2 (n = 6)	Rotation 2 & Management 2 (n = 6)	Rotation 1 & Management 3 (n = 2)	Rotation 2 & Management 3 (n = 2)
Management intensification practices						
Total nitrogen rate		186 (+16%)	185 (+15%)	162 (+1%)	100 (-38%)	128 (-20%)
Number of nitrogen applications		3.5 (+25%)	2.8 (-1%)	3.1 (+9%)	2.5 (-11%)	2.5 (-13%)
Total pesticide use intensity		3.2 (+18%)	3.3 (+21%)	2.7 (-1%)	1.4 (-49%)	1.6 (-39%)
Sowing date		12-oct (-6.5)	20-oct (+1.2)	20-oct (+1.0)	23-oct (+4.4)	22-oct (+3.6)
Variety disease resistance		5.0 (+2%)	4.7 (-4%)	5.0 (+2%)	6.9 (+40%)	3.5 (-29%)
Soil tillage intensity		1.5 (-12%)	1.8 (+7%)	1.0 (-44%)	3.4 (+99%)	1.7 (-2%)
Flexibility practices						
Flexibility of total pesticide use intensity		0.17	0.41	0.53	0.15	0.29
Flexibility of sowing date		0.5	3.4	2.9	3.5	0.4
Flexibility of variety earliness at heading stage		0.0	0.07	0.13	0.04	0.0

ZONE B

Practices	Rotation 1 & Management 1 (n =10)	Rotation 2 & Management 1 (n = 5)	Rotation 1 & Management 2 (n = 2)	Rotation 2 & Management 2 (n = 1)	Rotation 1 & Management 3 (n = 0)	Rotation 2 & Management 3 (n = 2)
Yield performances						
Yield in average weather conditions	56 q/ha (+2%)	62 q/ha (+13%)	56 q/ha (+2%)	67 q/ha (+23%)		28 q/ha (-49%)
Estimated coefficient bk	-22.8 (-0.5)	-31.3 (-9)	-13.2 (+9.5)	-13.6 (+9.0)		-10.9 (+11.5)
Rotation practices						
Rotation diversity	2.0 (-14%)	3.2 (+38%)	1.8 (-22%)	2.2 (-6%)		2.0 (-11%)
Frequency of summer crops	55% (-7%)	66% (+4%)	66% (+4%)	88% (+26%)		70% (+8%)
Frequency of legume crops	2% (-7%)	23% (+14%)	0% (-9%)	0% (-9%)		27% (+18%)
Frequency of cereals	71% (+4%)	61% (-6%)	71% (+4%)	59% (-8%)		64% (-3%)
Frequency of temporary meadow	0% (0%)	0% (0%)	0% (0%)	0% (0%)		3% (+3%)

ZONE B

Practices	Rotation 1 & Management 1 (n =10)	Rotation 2 & Management 1 (n = 5)	Rotation 1 & Management 2 (n = 2)	Rotation 2 & Management 2 (n = 1)	Rotation 1 & Management 3 (n = 0)	Rotation 2 & Management 3 (n = 2)
Management intensification practices						
Total nitrogen rate	219 (+9%)	191 (-4%)	198 (-1%)	227 (+13%)		88 (-56%)
Number of nitrogen applications	3.9 (+12%)	3.5 (0%)	3.4 (-2%)	3.3 (-7%)		1.5 (-57%)
Total pesticide use intensity	2.5 (-9%)	3.7 (+38%)	3.6 (+35%)	2.7 (+1%)		0.0 (-99%)
Sowing date	03-nov (-2.2)	29-oct (-7.3)	04-nov (-1.6)	05-nov (-1.0)		29-nov (+23.6)
Variety disease resistance	5.6 (-2%)	5.4 (-5%)	4.7 (-17%)	5.5 (-4%)		7.6 (+34%)
Soil tillage intensity	1.8 (+6%)	1.8 (+6%)	2.3 (+32%)	1.5 (-12%)		0.0 (-100%)
Flexibility practices						
Flexibility of total pesticide use intensity	0.26	0.22	0.42	0.17		0.0
Flexibility of sowing date	5.8	1.6	6.7	4.5		8.9
Flexibility of variety earliness at heading stage	0.07	0.0	0.04	0.0		0.32

ZONE C

Practices	Rotation 1 & Management 1 (n =0)	Rotation 2 & Management 1 (n = 3)	Rotation 1 & Management 2 (n = 1)	Rotation 2 & Management 2 (n = 5)	Rotation 1 & Management 3 (n = 1)	Rotation 2 & Management 3 (n = 7)
Yield performances						
Yield in average weather conditions		68 q/ha (+6%)	64 q/ha (0%)	67 q/ha (+4%)	53 q/ha (-17%)	62 q/ha (-3%)
Estimated coefficient bk		-18.2 (+5.3)	-28 (-4.0)	-42 (-18.2)	12.6 (+36.0)	-17.8 (+6.0)
Rotation practices						
Rotation diversity		3.8 (-6%)	4.1 (2%)	5.3 (33%)	3.8 (-6%)	3.1 (-23%)
Frequency of summer crops		55% (+2%)	31% (-22%)	55% (+2%)	75% (+22%)	51% (-2%)
Frequency of legume crops		29% (+5%)	25% (-6%)	25% (-6%)	0% (-31%)	38% (+7%)
Frequency of cereals		67% (+2%)	72% (+7%)	56% (-9%)	87% (+22%)	67% (+2%)
Frequency of temporary meadow		27% (-14%)	38% (-4%)	3% (-38%)	50% (+9%)	72% (+31%)

ZONE C

Practices	Rotation 1 & Management 1 (n =0)	Rotation 2 & Management 1 (n = 3)	Rotation 1 & Management 2 (n = 1)	Rotation 2 & Management 2 (n = 5)	Rotation 1 & Management 3 (n = 1)	Rotation 2 & Management 3 (n = 7)
Management intensification practices						
Total nitrogen rate		163 (+16%)	133 (-5%)	171 (+22%)	100 (-29%)	120 (-14%)
Number of nitrogen applications		3.3 (+33%)	2.5 (0%)	2.9 (+14%)	1.5 (-40%)	2.1 (-17%)
Total pesticide use intensity		4.3 (+33%)	2.1 (-33%)	4.4 (+37%)	2.1 (-33%)	2.1 (-33%)
Sowing date		25-oct (+1.4)	28-oct (+4.6)	21-oct (-2.1)	27-oct (+3.0)	22-oct (-1.3)
Variety disease resistance		4.5 (-4%)	5.5 (+17%)	5.1 (+8%)	1.7 (-65%)	4.8 (+2%)
Soil tillage intensity		2.4 (+11%)	5.0 (+127%)	1.9 (-13%)	2.5 (+14%)	2.0 (-11%)
Flexibility practices						
Flexibility of total pesticide use intensity		0.41	0.35	0.54	0.0	0.17
Flexibility of sowing date		4.7	6.3	2.7	0.0	1.2
Flexibility of variety earliness at heading stage		0.36	0.24	0.20	0.0	0.23

ZONE D

Practices	Rotation 1 & Management 1 (n =3)	Rotation 2 & Management 1 (n = 0)	Rotation 1 & Management 2 (n = 9)	Rotation 2 & Management 2 (n = 8)	Rotation 1 & Management 3 (n = 2)	Rotation 2 & Management 3 (n = 0)
Yield performances						
Yield in average weather conditions	73 q/ha (-7%)		78 q/ha (0%)	84 q/ha (+7%)	68 q/ha (-13%)	
Estimated coefficient bk	-12.5 (-4.3)		-17.5 (-9.2)	1.6 (+9.9)	1.2 (+9.0)	
Rotation practices						
Rotation diversity	2.6 (-22%)		2.8 (-14%)	4.4 (+34%)	2.6 (-21%)	
Frequency of summer crops	14% (-20%)		27% (-7%)	54% (+20%)	12% (-22%)	
Frequency of legume crops	14% (-1%)		6% (-9%)	31% (+16%)	0% (-15%)	
Frequency of cereals	75% (+4%)		74% (+3%)	62% (-9%)	77% (+6%)	
Frequency of temporary meadow	0% (-1%)		0% (-1%)	2% (+1%)	0% (-1%)	

ZONE D

Practices	Rotation 1 & Management 1 (n =3)	Rotation 2 & Management 1 (n = 0)	Rotation 1 & Management 2 (n = 9)	Rotation 2 & Management 2 (n = 8)	Rotation 1 & Management 3 (n = 2)	Rotation 2 & Management 3 (n = 0)
Management intensification practices						
Total nitrogen rate	158 (-7%)		175 (+3%)	183 (+8%)	145 (-15%)	
Number of nitrogen applications	3.0 (+1%)		3.0 (0%)	3.2 (+5%)	2.6 (-13%)	
Total pesticide use intensity	5.0 (+2%)		4.8 (-3%)	4.9 (-1%)	5.9 (+20%)	
Sowing date	15-oct (-0.4)		16-oct (0)	18-oct (+2.5)	04-oct (-11.3)	
Variety disease resistance	5.0 (+2%)		5.0 (+3%)	4.6 (-6%)	5.5 (+12%)	
Soil tillage intensity	3.2 (+25%)		2.8 (+8%)	2.3 (-10%)	2.1 (-20%)	
Flexibility practices						
Flexibility of total pesticide use intensity	0.3		0.6	0.7	0.4	
Flexibility of sowing date	2.2		6.3	8.6	4.3	
Flexibility of variety earliness at heading stage	0.0		0.3	0.4	0.3	

ZONE E

Practices	Rotation 1 & Management 1 (n =1)	Rotation 2 & Management 1 (n = 6)	Rotation 1 & Management 2 (n = 3)	Rotation 2 & Management 2 (n = 7)	Rotation 1 & Management 3 (n = 11)	Rotation 2 & Management 3 (n = 0)
Yield performances						
Yield in average weather conditions	92 q/ha (+12%)	80 q/ha (-2%)	86 q/ha (+5%)	83 q/ha (+1%)	81 q/ha (-1%)	
Estimated coefficient bk	+6.5 (+11.0)	-13.5 (-8.7)	+10.0 (+14.7)	4.1 (+8.7)	-10.4 (-5.8)	
Rotation practices						
Rotation diversity	1.3 (-38%)	2.2 (+9%)	1.9 (-7%)	2.4 (+18%)	1.8 (-10%)	
Frequency of summer crops	0% (-40%)	16% (-24%)	37% (-3%)	39% (-1%)	60% (+20%)	
Frequency of legume crops	0% (-5%)	12% (+7%)	2% (-3%)	12% (+7%)	0% (-5%)	
Frequency of cereals	100% (+11%)	82% (-7%)	91% (+2%)	79% (-10%)	98% (+9%)	
Frequency of temporary meadow	0% (-1%)	0% (-1%)	0% (-1%)	6% (+5%)	0% (-1%)	

ZONE E

Practices	Rotation 1 & Management 1 (n =1)	Rotation 2 & Management 1 (n = 6)	Rotation 1 & Management 2 (n = 3)	Rotation 2 & Management 2 (n = 7)	Rotation 1 & Management 3 (n = 11)	Rotation 2 & Management 3 (n = 0)
Management intensification practices						
Total nitrogen rate	171 (+14%)	163 (+9%)	163 (+8%)	159 (+6%)	105 (-30%)	
Number of nitrogen applications	3.0 (+11%)	3.2 (+18%)	2.7 (0%)	3.0 (+10%)	2.2 (-19%)	
Total pesticide use intensity	4.7 (+37%)	3.6 (+6%)	4.4 (+29%)	3.4 (+1%)	3 (-12%)	
Sowing date	26-oct (-3.6)	24-oct (-5.3)	11-nov (+12.8)	05-nov (+6.0)	30-oct (+0.8)	
Variety disease resistance	4.0 (-29%)	5.0 (-11%)	5.7 (+2%)	5.6 (0%)	6.0 (+8%)	
Soil tillage intensity	3.8 (+156%)	2.7 (+82%)	2.0 (+33%)	2.1 (+38%)	0.1 (-91%)	
Flexibility practices						
Flexibility of total pesticide use intensity	0.6	0.2	0.5	0.6	0.2	
Flexibility of sowing date	0.6	2.4	10.7	8.6	0.5	
Flexibility of variety earliness at heading stage	0.0	0.1	0.2	0.3	0.2	

ZONE F

Practices	Rotation 1 & Management 1 (n =4)	Rotation 2 & Management 1 (n = 8)	Rotation 1 & Management 2 (n = 10)	Rotation 2 & Management 2 (n = 4)	Rotation 1 & Management 3 (n = 2)	Rotation 2 & Management 3 (n = 2)
Yield performances						
Yield in average weather conditions	75 q/ha (+2%)	82 q/ha (+11%)	73 q/ha (-1%)	75 q/ha (+2%)	55 q/ha (-26%)	61 q/ha (-18%)
Estimated coefficient bk	-17.4 (-11.3)	-16.3 (-10.1)	-4.1 (+2.0)	3.8 (+10.0)	18.9 (+25.0)	1.0 (+7.5)
Rotation practices						
Rotation diversity	2.9 (-16%)	4.1 (+19%)	2.8 (-19%)	4.7 (+37%)	2.5 (-27%)	3.6 (+7%)
Frequency of summer crops	9% (-23%)	50% (+18%)	26% (-6%)	38% (+6%)	61% (+29%)	43% (+11%)
Frequency of legume crops	0% (-10%)	31% (+21%)	2% (-8%)	6% (-4%)	0% (-10%)	11% (+1%)
Frequency of cereals	67% (-2%)	58% (-11%)	72% (+3%)	69% (0%)	92% (+23%)	78% (+9%)
Frequency of temporary meadow	0% (-9%)	26% (+17%)	2% (-7%)	6% (-3%)	6% (-3%)	11% (+2%)

ZONE F

Practices	Rotation 1 & Management 1 (n =4)	Rotation 2 & Management 1 (n = 8)	Rotation 1 & Management 2 (n = 10)	Rotation 2 & Management 2 (n = 4)	Rotation 1 & Management 3 (n = 2)	Rotation 2 & Management 3 (n = 2)
Management intensification practices						
Total nitrogen rate	170 (+6%)	169 (+6%)	156 (-2%)	160 (0%)	138 (-14%)	165 (+3%)
Number of nitrogen applications	3.7 (+14%)	3.2 (-1%)	3.3 (+5%)	3.4 (+6%)	2 (-38%)	3 (-6%)
Total pesticide use intensity	5.2 (+22%)	5.1 (+19%)	3.8 (-12%)	4 (-7%)	2.4 (-43%)	3.8 (-13%)
Sowing date	03-oct (-4.0)	02-oct (-4.5)	08-oct (+1.0)	07-oct (+0.6)	12-oct (+5.6)	08-oct (+1.8)
Variety disease resistance	4.9 (-3%)	5.0 (-1%)	5.0 (-1%)	5.4 (+6%)	5.4 (+7%)	4.7 (-9%)
Soil tillage intensity	4.3 (+24%)	3.4 (-2%)	2.8 (-21%)	4.3 (+24%)	4.1 (+18%)	2.9 (-18%)
Flexibility practices						
Flexibility of total pesticide use intensity	0.4	0.3	0.8	0.5	0.2	0.4
Flexibility of sowing date	0.6	1.8	6.0	7.8	3.0	1.1
Flexibility of variety earliness at heading stage	0.2	0.1	0.3	0.2	0.2	0.2

Annexe 5.4 : Typologie complémentaire

***Tableau 5.4.1** : Management practice characteristics of the three clusters defined in the complementary typology (inclusion of robustness coefficient among the entry variables)*

Wheat management practice	Management 1 (n = 43)	Management 2 (n = 40)	Management 3 (n = 51)
Yield robustness to abiotic perturbations			
Estimated coefficient bk	-5.1 (**)	+6.3 (*)	-0.7 (*NS*)
Management intensification practices (Group 1)			
Total nitrogen rate	+11 % (***)	+6 % (***)	-16 % (***)
Number of nitrogen applications	+14 % (***)	+3 % (*NS*)	-12 % (***)
Total pesticide use intensity	+18 % (***)	+8 % (**)	-22 % (***)
Sowing date	-3.2 (***)	+1.5 (*NS*)	+2.0 (***)
Variety disease resistance	-5 % (**)	-1 % (NS)	+5 % (*NS)*
Soil tillage intensity	+16 % (**)	+12 % (*NS)*	-24 % (***)
Flexibility practices (Group 2)			
Flexibility of total pesticide use intensity	0.32 (***)	0.67 (***)	0.27 (***)
Flexibility of sowing date	3.2 (**)	7.9 (***)	2.0 (***)
Flexibility of variety earliness at heading stage	0.11 (***)	0.27 (***)	0.17 (*NS)*

Note 1: n is the number of observations; average gap in percentage with respect to regionalized averages, empirical standard deviation of the gap in brackets.

Note 2: Student's t-test of the equality of the variable to zero (first group) or to the standard deviation calculated over the full set of wheat cropping systems (second group, the reference standard deviations are equal to 0.41, 4.2 et 0.18, respectively): *** significant at P<0.01, ** significant at P<0.05, * significant at P<0.10, NS for not significant).

Tableau 5.4.2 *: Yield performances of the six clusters defined by full typology elaborated from rotation practices and management practices augmented with the robustness variable.*

Practices	**Rotation 1 & Management 1 (n = 18)**	**Rotation 2 & Management 1 (n = 22)**	**Rotation 1 & Management 2 (n = 27)**	**Rotation 2 & Management 2 (n = 25)**	**Rotation 1 & Management 3 (n = 18)**	**Rotation 2 & Management 3 (n = 24)**
Yield performances						
Yield in average weather conditions	+6% (**)	+5% (**)	-1% (NS)	+6% (**)	-6% (**)	-5% (NS)
Estimated coefficient bk	+ 0.8 (NS)	- 9.2 (**)	-1.3 (NS)	+15.6 (**)	-1.0 (NS)	-0.25 (NS)

Note 1: n is the number of cropping systems; average gap in percentage with respect to regionalized averages.

Note 2: Student's t-test of the equality of the variable to zero: *** significant at P<0.01, ** significant at P<0.05, * significant at P<0.10, NS for not significant.

Annexe 6.1 : Résultats économétriques

Summary table of the results of the regression model defined in Equation (2):

$$TFI_{ikt} = a_0 + [a_k.D(k)] + [b_k.D(k)].FP_{it} \qquad (2)$$

where TFI_{ikt} is the fungicide treatment frequency index of plot i in cropping system k at time t, $D(k)$ are dummy variables of cropping systems k, and FP_{it} is the fungal pressure intensity index for plot i at year t (t ϵ [2011, ..., 2014]); a_0, a_k, b_k are parameters to be estimated.

Number of plots (i)	2327
Number of cropping systems (k)	145
Number of years (t)	4 [2011-2014]
Residual standard error	0.40
Degrees of freedom	2028
Multiple R-squared	0.6802
Adjusted R-squared	0.6345
F-statistic (p-value)	14.88 (p-value: < 2.2e-16)

Fisher test for testing the cropping system effect.

The Fisher test is a common method of testing the additional value of including new variables in a model. Here, we are testing the additional value of including dummy variables corresponding to the 145 cropping systems (parameters b_k). Thus, we compare the two following models:

- Model 1: $TFI_{ikt} = a_0 + [a_k.D(k)] + b.FP_{it}$
- Model 2: $TFI_{ikt} = a_0 + [a_k.D(k)] + [b_k.D(k)].FP_{it}$

The Fisher test approach is to test the additional value of the simultaneous inclusion of the 145 dummy variables in Model 2. Hypothesis testing is H0: $b_1 = b_2 = ... = b_{145} = 0$ versus H1: at least one cropping system has a parameter b_k which is significantly different from zero.

```
Analysis of Variance Table
Model 1: TFI ~ BIO + SDC
Model 2: TFI ~ BIO:SDC + SDC
  Res.Df    RSS  Df Sum of Sq      F    Pr(>F)
1   2172 480.17
2   2028 324.39 144    155.79 6.7635 < 2.2e-16 ***
---
Signif. codes:  0 ‘***’ 0.001 ‘**’ 0.01 ‘*’ 0.05 ‘.’ 0.1 ‘ ’ 1
```

The p-value of the Fisher test (Pr(>F) < 2.2 e-16) shows that at least one dummy variable associated with the FP index brings additional value for predicting fungicide TFI.

Description of the coefficients associated with each cropping system. Values of parameters a_k and b_k are presented, as well as t-values corresponding to Student tests associated with hypothesis H0: $a_k = 0$ versus H1: $a_k \neq 0$ (or H0: $b_k = 0$ versus H1: $b_k \neq 0$).

Test of significance: (***) significant at P<0.01, (**) significant at P<0.05, (*) significant at P<0.1; in grey are the "extreme" observations.

Geographical zone	Cropping system ID	Parameter a_k	Parameter b_k
A	170	2.82 (***)	-3.70
A	311	1.29	0.18
A	320	1.91	-2.91
A	244002	0.71	5.17 (***)
A	251500	0.47	2.03
A	1045792	0.41	5.41 (***)
A	1987469	0.38 (*)	2.6 (*)
A	2376836	0.31	2.00
A	2512543	0.71	0.70
A	2633840	2.09 (**)	-4.4 (***)
A	4145515	1.64 (*)	-0.84
A	4189669	4.52 (***)	-15.68 (***)
A	4244350	0.57	0.17
A	4301836	1.5	-1.95 (*)
A	5047526	0.65	2.13
A	5172728	0.73	3.53
A	5417258	2.46 (***)	-0.86
B	666	0.52 (*)	1.44
B	769	1.48	-2.39 (*)
B	3754	0 (***)	0.00
B	6828	0.57	3.15 (***)
B	6988	1.07	-1.86
B	7379	3.19 (**)	-4.84
B	8179	1.45	0.07
B	8405	0.43 (**)	0.84
B	8702	0.84	0.17
B	9057	-2.97 (***)	17.08 (***)
B	10269	1.32	-1.13
B	10572	1.72 (***)	-0.57

Geographical zone	Cropping system ID	Parameter a_k	Parameter b_k
B	10986	0 (***)	0.00
B	11009	1.61 (**)	-2.7 (***)
B	11157	0.77	-0.04
B	42881	1.31	0.17
B	42944	1.88 (**)	-3.01 (**)
B	1029453	0.43	4.14
B	1029557	-0.22 (*)	5.32 (**)
B	1029622	0.9	4.50
B	1036648	1.04	3.11
C	12394	1.36	-1.38 (*)
C	16184	2.32 (**)	-7.44 (***)
C	41193	1.39	-1.8 (**)
C	68612	1.73 (***)	-1.38
C	119029	0.87	0.21
C	170096	1.81 (***)	-2.11 (*)
C	196900	1.39	-2.3 (**)
C	203139	-0.44 (***)	6.13 (***)
C	205012	0.49 (*)	0.62
C	304644	2.12 (***)	-3.28 (***)
C	809489	0.76	0.79
C	23005962	0.52 (*)	-0.05
C	23007597	1.74 (***)	-0.58
C	23016639	1.23	-1.8 (***)
C	23016812	0.88	-0.30
C	23017463	0.85	0.58
C	GCF	0.97	2.29 (*)
D	11268	0.3 (**)	6.1 (***)
D	12441	0.74	5.21 (*)
D	1321009	0.75	3.49 (*)
D	1379010	1.62 (**)	-0.24
D	1383407	1.35	4.41 (**)
D	1403150	3.87 (***)	-7.89 (***)
D	1410304	0.93	-0.24
D	1642801	1.96 (***)	1.30
D	1656879	2.27 (***)	-2.73 (**)

Geographical zone	Cropping system ID	Parameter a_k	Parameter b_k
D	1698543	2.67 (***)	-2.46 (**)
D	216000050	0.97	0.07
D	216000230	1	2.54 (***)
D	216006956	1.32	0.86
D	216033405	1.06	-0.43
D	216034049	1.51 (*)	-1.73 (**)
D	216065381	1.13	1.19
D	216065525	1.25	0.91
D	216076019	1.38	-0.40
D	216584910	1.38	-1.03
D	216733567	1.49	0.41
D	VALFRANCE1	1.97 (***)	1.65 (*)
D	VALFRANCE2	2.4 (***)	-1.31
D	VALFRANCE3	1.48	-1.47
D	VALFRANCE4	3.25 (***)	-6.6 (***)
D	VALFRANCE5	1.75 (*)	-2.11
E	27207	1.92 (**)	0.42
E	40073	1.36	1.04
E	47967	1.22	1.22
E	50839	0.5	5.32 (***)
E	64444	0.61	8.3 (***)
E	78964	0.69	5.4 (***)
E	117049	0.48	2.48
E	119438	0.5	4.7 (***)
E	131466	0.11 (**)	8.6 (***)
E	178358	-1.09 (***)	7.59 (***)
E	207013	1	0.00
E	246769	1.93 (***)	-1.3 (*)
E	261158	1.03	1.44
E	262036	-0.04 (*)	5.22 (***)
E	345014	0.9	1.65 (*)
E	356127	-0.4 (***)	4.07 (***)
E	374710	0.25 (*)	3.91 (***)
E	381644	0.08 (**)	5.12 (***)
E	388109	1.31	-1.04

Geographical zone	Cropping system ID	Parameter a_k	Parameter b_k
E	392258	0.48	3.71 (***)
E	393729	0.78	2.44 (*)
E	404625	0.92	4.62 (***)
E	459842	0.69	1.87 (**)
E	494070	0.8	6.39 (***)
E	537373	0.39	5.44 (**)
E	592758	0.88	4.41 (**)
E	630186	0.74	3.12 (*)
E	718403	0.32 (***)	4.81 (***)
F	25534	2.31 (***)	-5.08 (***)
F	25682	1.11	0.79
F	30953	0.29 (*)	1.43
F	96635	1.31	-1.02
F	319323	2.82 (***)	-7.56 (***)
F	325941	2.48 (**)	1.54
F	355226	1.3	4.76
F	502970	3.77 (***)	-11.44 (***)
F	505179	2.31 (**)	-4.20
F	557220	2.74 (***)	-4.85 (**)
F	A00694	0.39	2.31
F	A00717	2.34 (***)	-3.10
F	A01743	1.48	-3.14
F	A02916	0.79	4.93 (**)
F	A03247	1.45	0.57
F	A03339	0.88	1.25
F	A03778	0.6	4.4 (**)
F	A04887	2	-1.25
F	A05042	-0.87 (***)	10.83 (***)
F	A05362	1.12	4.78 (**)
F	A05410	-0.31 (***)	3.87 (*)
F	A05554	0.47	6.11 (***)
F	A13193	1.6	-2.06
F	A13425	2.35	-4.29
F	A13635	0.63	3.11
F	A13801	7.03	-71.00

Geographical zone	Cropping system ID	Parameter a_k	Parameter b_k
F	A14557	1.46	-1.81
F	A15318	0.43	5.39 (**)
F	A24626	1.64	-3.35
F	A25817	1.65	-2.08
F	A33667	-0.18 (***)	6.83 (***)
F	A36863	1.34	-3.83 (***)
F	CAL07954	1.72 (**)	-4.6 (***)
F	CAL26328	1.14	3.01 (***)
F	CAL27852	16.29 (*)	-153.3 (**)
F	CAL30047	-0.43 (***)	6.81 (***)
F	CAL76744	2.08 (***)	-4.15 (***)

Annexe 7.1 : Note sur les différents critères de quantification de la robustesse

La robustesse est définie comme la capacité d'un individu (au sens statistique, par exemple d'une exploitation agricole ou d'une race animale) à maintenir son niveau de performance malgré l'apparition de perturbations. A l'échelle d'une exploitation agricole, on peut ainsi étudier la robustesse des performances économiques face à la volatilité des prix des produits et des intrants agricoles, la robustesse des performances productives face à la variabilité climatique, la robustesse des performances environnementales face aux évolutions du marché ou des politiques publiques, etc.

Dans notre cas, nous avons choisi de limiter notre étude à la robustesse du rendement du blé tendre d'hiver face à la variabilité climatique et biotique. Une exploitation agricole ou un système de culture seront donc qualifiés comme *robustes* au regard de leurs rendements si ils parviennent à maintenir leurs niveaux de production relativement stables malgré l'augmentation des perturbations exogènes. En d'autres termes, s'ils parviennent à *tamponner* les effets de ces perturbations exogènes sur le rendement du blé tendre.

Néanmoins, la quantification de la robustesse du rendement peut s'envisager à travers différents critères. Cette note vise à en faire l'inventaire et la description. Leur application sur quelques systèmes de culture issus du réseau FERMEcophyto permettra d'étudier l'opérationnalité de ces différents critères sur un jeu de données tel que celui fourni par Agrosolutions.

1. Méthodes de quantification – quelques éléments théoriques

Nous distinguerons ci-après deux manières d'analyser la robustesse :

- La première vise à évaluer la robustesse à travers la forme de distribution des rendements au cours d'une période donnée. Différents critères statistiques (utilisés pour certains dans l'analyse des risques financiers) existent pour décrire la forme de distribution des rendements et conclure sur la plus ou moins grande robustesse des exploitations.
- La seconde manière d'analyser la robustesse étudie plus directement la relation entre d'une part l'intensité des perturbations qui touchent ces exploitations et d'autre part la variabilité des rendements observée.

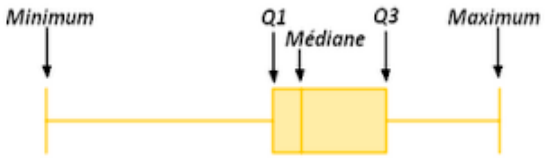
Nous verrons que ces deux méthodes de quantification peuvent être intéressantes selon les cas de figure, même si pour certaines elles seront limitées par le type de données disponibles.

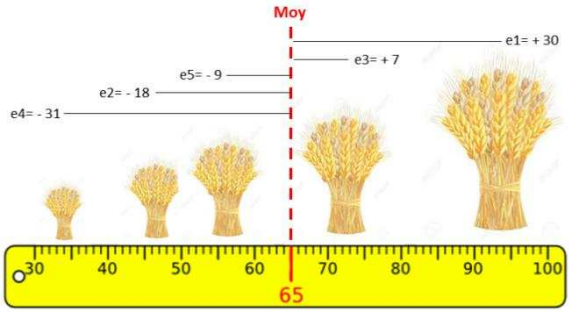
1.1. Analyse de la distribution des rendements du blé tendre

Cette première option vise à quantifier la robustesse du rendement à travers la distribution du rendement sur une série temporelle afin d'analyser si elle est plutôt resserrée autour de sa moyenne ou plutôt étalée. Nous présentons ci-dessous différents critères qui permettent d'étudier plus ou moins précisément la forme de cette distribution.

1.1.1. Analyse de la dispersion du rendement

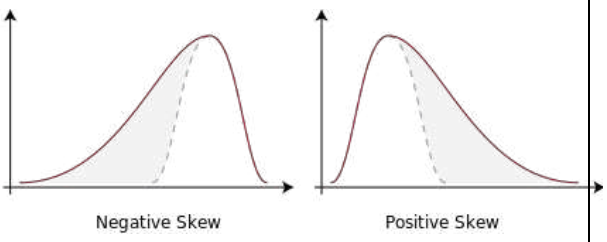
L'amplitude et la variance sont deux critères qui permettent de quantifier le niveau de dispersion du rendement :

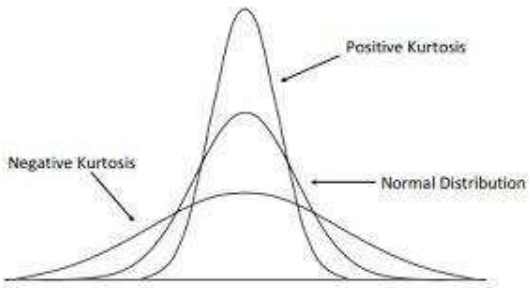
Amplitude de la distribution	
L'amplitude Min-Max mesure l'écart entre la valeur de l'observation maximale (x_{max}) et celle de l'observation minimale (x_{min}). Comme elle peut être sensible aux valeurs extrêmes, d'autres critères peuvent être également utilisés comme l'écart interdécile (écart entre le premier et le neuvième décile) ou l'écart interquartile (écart entre le premier et le troisième quartile). Une exploitation est alors évaluée comme robuste si elle présente des amplitudes Min-Max, D1-D9 ou Q1-Q3 resserrées.	*Amplitude Min-Max* = $x_{max} - x_{min}$ *Ecart interdécile* = $x_{D9} - x_{D1}$ *Ecart interquartile* = $x_{Q3} - x_{Q1}$ 

Ecart type et coefficient de variation	
L'écart type (*s*) donne une indication de l'écart moyen entre la valeur de chaque observation (x_i) et la moyenne de la population ($\bar{x}$). Le coefficient de variation (*CoV*) est également utilisé pour exprimer la valeur de cet écart relativement à la moyenne (dans le but généralement de comparer les écarts entre des populations ayant des moyennes différentes). Ces deux critères sont généralement plus utilisés que les mesures d'amplitude car ils donnent une meilleure idée de la dispersion totale de la population, sans être trop sensibles aux valeurs extrêmes.	$s = \frac{\sqrt{\sum_{i=1}^{n} (x_i - \bar{x})^2}}{n-1}$ $\quad CoV = \frac{s}{\bar{x}} x\,100$ 

1.1.2. *Analyse de la forme de la distribution*

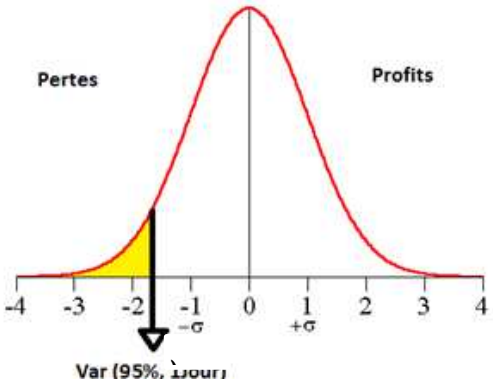
Au-delà de l'analyse de la dispersion autour de la moyenne, d'autres critères ont été mis au point pour étudier la forme de la distribution :

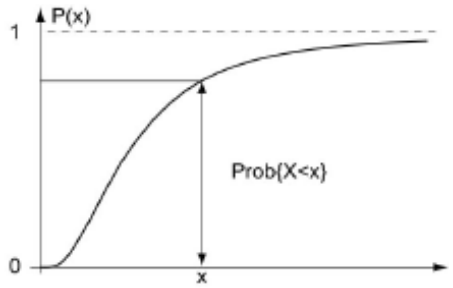
Coefficient de symétrie (*skewness*)	
Le skewness est un indicateur d'hétérogénéité qui permet d'étudier si la distribution d'une population est symétrique (cas d'une loi normale) ou si sa queue de distribution est étalée vers la gauche ou vers la droite. Un skewness négatif signifie alors que les rendements inférieurs à la moyenne ont une plus grande fréquence que les rendements supérieurs à la moyenne. En d'autres termes, cela signifie que la population présente un risque de rendement important car les années à faible rendement sont plus fréquentes que les années à fort rendement.	$Skewness = \frac{\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}(x_i - \overline{x})^3}{\left(\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}(x_i - \overline{x})^2\right)^{3/2}}$ 

Coefficient d'aplatissement (*kurtosis*)	
Le kurtosis est une mesure de l'aplatissement de la distribution. Il mesure, hors effet de dispersion (donnée par l'écart type), la disposition des masses de probabilité autour de leur centre, c'est-à-dire, d'une certaine façon, leur regroupement proche ou loin du centre de probabilité. Un coefficient négatif est caractéristique des distributions à « queues épaisses », ce qui implique des valeurs anormales (i.e. très basses ou très hautes) plus fréquentes. Un individu averse au risque préférera donc une distribution avec un kurtosis positif, i.e. avec une distribution dont les rendements ne sont pas trop éloignés de la moyenne.	$Kurtosis = \frac{\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}(x_i - \overline{x})^4}{\left(\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}(x_i - \overline{x})^2\right)^2} - 3$ 

1.1.3. *Analyse de la fonction de répartition*

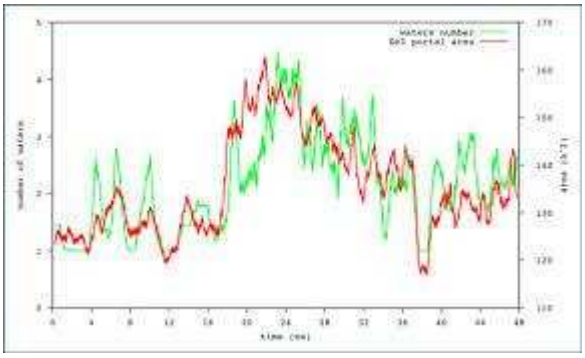
Une autre façon d'analyser la distribution du rendement est de s'intéresser à la fonction de répartition. Les deux méthodes suivantes analysent donc la distribution du rendement en termes de probabilités : soit à travers l'estimation du rendement correspondant à un niveau de probabilité donné, soit à travers l'évaluation du niveau de probabilité que le rendement soit inférieur à un seuil donné.

Value at Risk (VaR)	
La VaR est une notion fréquemment utilisée en finance pour mesurer le risque de marché d'un portefeuille d'instruments financiers et qui correspond au montant de pertes qui ne devrait être dépassé qu'avec une probabilité donnée (généralement 5%). En d'autres termes, elle correspond au montant de perte maximal obtenu dans 95% des cas les plus favorables. Prenons un exemple avec la distribution des rendements entre 2 exploitations agricoles : l'exploitation A présente une VaR (95%) de -10% de rendement par rapport à sa moyenne quand l'exploitation B indique -30% de rendement. L'exploitation A sera dite plus robuste car elle parvient à limiter ses pertes de rendements et elle présente donc moins de risques.	$\mathbf{VaR}_{95\%}^{\%} = (-1.645)\sigma$ 

Probabilité que le rendement soit inférieur à un seuil donné	
A partir de la fonction de répartition, on peut également estimer le niveau de probabilité que le rendement soit inférieur à un seuil donné. Par exemple, on peut s'intéresser à la probabilité que le rendement du blé soit inférieur à un seuil arbitraire de 60 q/ha. Plus cette probabilité sera grande, moins cette exploitation pourra être considérée comme robuste car son rendement sera plus fréquemment sous le seuil défini.	 Fonction de répartition P(x)

1.1.4. Analyse de la distribution du rendement par rapport à la distribution d'une situation de référence

Coefficient bêta (ß)	
En finance, le coefficient ß d'une entreprise ($ß_a$) correspond au rapport de la volatilité du prix d'un actif (par exemple le cours de bourse d'une action) sur celle des prix du marché en général (par exemple un indice boursier de référence). Il se calcule comme la covariance entre la valeur de l'action (r_a) et la valeur de l'indice (r_b),	$$\beta_a = \frac{\mathrm{Cov}(r_a, r_b)}{\mathrm{Var}(r_b)},$$

divisé par la variance de l'indice. Plus la valeur du coefficient ß est élevé (supérieur à 1) et plus cette entreprise aura tendance à amplifier les mouvements du marché. Il peut donc être traduit en indicateur de risque du rendement agricole : plus la variation du rendement d'une exploitation sera importante par rapport à celle observée à l'échelle du département, plus on pourra dire que cette exploitation est risquée, c'est à dire peu robuste.	

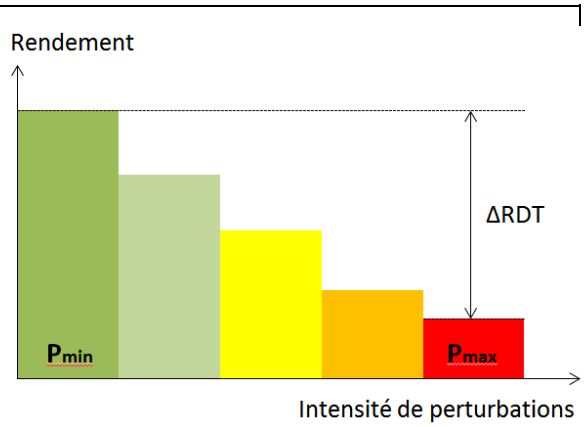
1.2. Analyse de la réponse du rendement face à l'augmentation des perturbations

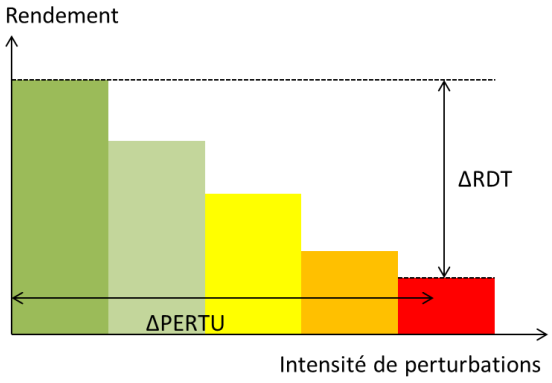
Une seconde option pour étudier la robustesse du rendement d'une exploitation consiste à analyser la réponse du rendement face à l'augmentation du niveau de perturbations. Est-ce que cette réponse est instantanée et forte (auquel cas on dira que cette exploitation est peu robuste face à ce type de perturbations) ou bien est-ce que cette réponse est progressive et limitée (auquel cas on dira plutôt que cette exploitation est robuste) ?

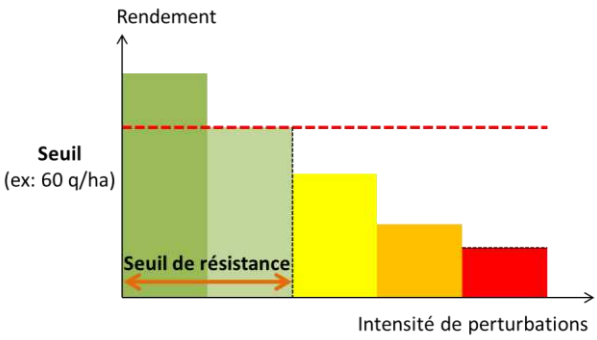
Cette deuxième option est particulièrement adaptée dans le cas où l'on souhaite comparer la robustesse de plusieurs exploitations ayant été exposées à des perturbations de nature et d'intensité différentes. En effet, pour comparer rigoureusement la robustesse de deux exploitations, il faut pouvoir discuter la variabilité du rendement observée au regard du niveau de perturbations enregistré. Prenons le cas de deux exploitations pour lesquelles on a mesuré pour chacune un coefficient de variation de 20%. A travers cet unique critère, on pourrait conclure qu'elles sont autant robuste l'une que l'autre. Pourtant si l'on apprend que l'une des deux a été exposée à des variations de prix, de bioagresseurs ou de climat importantes alors que l'autre a été largement moins exposée, on changerait probablement d'avis en désignant comme la plus robuste celle qui est parvenu à limiter la variabilité de son rendement malgré des conditions extérieures plus difficiles. Quantifier rigoureusement la robustesse du rendement c'est donc croiser à la fois des informations sur la distribution du rendement et sur la distribution des perturbations.

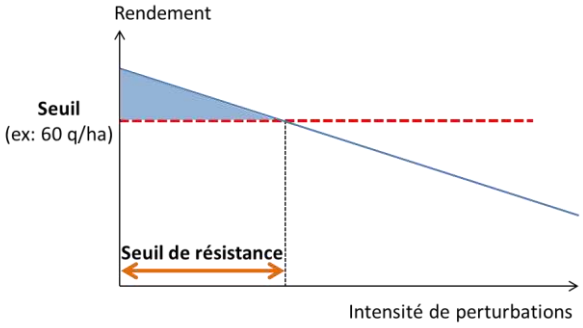
Les différentes méthodes présentées ci-dessous ont donc été imaginées pour pouvoir comparer la robustesse d'exploitations soumises à des niveaux de perturbations différents :

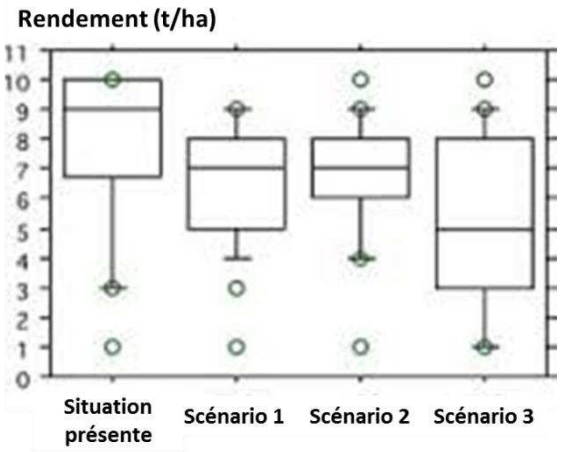
Amplitude du rendement entre faible et forte intensités de perturbations	
En quantifiant l'écart de rendement (*ΔRDT*, en absolu ou en relatif) entre une situation à faible intensité de perturbations (P_{min}) et une situation à forte intensité (P_{max}), on peut estimer assez rapidement la fragilité d'une exploitation donnée vis-à-vis de la perturbation étudiée. De la sorte, une exploitation A qui présente une amplitude de rendement de 30% entre une année à faible risque climatique et une année à très fort risque sera qualifiée de moins robuste qu'une exploitation B qui, pour les mêmes	$$\Delta RDT = \frac{(RDT_{P_{min}} - RDT_{P_{max}})}{RDT_{P_{min}}}$$

niveaux de stress, présentera une amplitude de rendement de 15% par exemple.	

Elasticité du rendement	
En économie, l'élasticité mesure la variation d'une grandeur provoquée par la variation d'une autre grandeur. Ainsi, pour une exploitation donnée, si son rendement diminue de 15% quand le niveau de perturbation augmente de 30%, l'élasticité du rendement (*ELAS*) par rapport au niveau de perturbation est le quotient de la variation de rendement (*ΔRDT*) rapporté à la variation de niveau de perturbation (*ΔPERTU*), soit -0.5 = (-15 % / 30 %). De manière équivalente, cette élasticité se mesure à travers la pente de la droite de régression linéaire (y = ax+b) du rendement en fonction du niveau de perturbation : plus cette pente (i.e. le coefficient a) est grande et moins l'exploitation est robuste vis-à-vis de ces perturbations.	$$ELAS = \frac{\Delta RDT}{\Delta PERTU}$$ 

Seuil de résistance aux perturbations	
Pour mesurer la robustesse du rendement, une autre méthode consiste à quantifier jusqu'à quel niveau d'intensité de perturbations une exploitation donnée est capable de maintenir son rendement conformément à ses objectifs. Si on reprend l'exemple précédent où on fixait un seuil arbitraire de 60 q/ha, cette méthode vise à quantifier le niveau de perturbations maximal jusqu'auquel cette exploitation est capable de maintenir un rendement supérieur à 60 q/ha. Plus ce niveau de perturbations maximal sera grand et plus on pourra considérer que cette exploitation est robuste.	

Aire entre la courbe de réponse et l'objectif de rendement	
En utilisant les résultats du seuil de résistance présentés ci-dessus, il est possible de quantifier un autre critère qui traduit directement l'interaction entre le niveau de résistance face aux perturbations et le niveau de rendement de l'exploitation. Dans le schéma ci-contre, nous prenons le cas d'une courbe de réponse linéaire du rendement face à l'augmentation des perturbations. L'aire du triangle rectangle représenté en bleu traduit le volume de production de l'exploitation avant de franchir le seuil fixé.	

Stress testing	
Dans le domaine de la finance, les tests de résistance (ou *stress testing*) sont des procédures destinées à évaluer les pertes d'une institution financière face à des conditions de marché extrêmes (e.g. forte récession, baisse massive des prix de l'immobilier). La procédure consiste à créer des simulations de crise, à travers des scénarios fictifs ou basés sur des événements historiques, pour évaluer la résistance d'une banque. Cette méthode pourrait également être utilisée avec des scénarios illustrant par exemple une plus fréquence d'événements climatiques extrêmes ou une plus grande volatilité des prix du marché. En utilisant un modèle bioéconomique, il est alors possible d'évaluer l'impact de ces différents scénarios sur les performances d'une exploitation (la résistance aux chocs est alors mesurée via des indicateurs tels que la capacité à maintenir un niveau de revenu ou de production donné).	

Annexe 7.2 : Détail des conditions météorologiques au cours des quatre campagnes culturales de 2011 à 2014

Au cours de la campagne 2010/2011 (Tableau 7.2.1), les conditions météorologiques ont été principalement marquées par un printemps sec sur l'ensemble du territoire. Un déficit hydrique précoce s'est installé dès le mois de mars pour l'ensemble des zones géographiques. Le manque d'eau a également perturbé la disponibilité des éléments minéraux pour les cultures. Le remplissage des grains s'est néanmoins déroulé dans de bonnes conditions avec le retour des pluies et de la fraîcheur après la floraison. L'offre en rayonnement a été bonne. Plus localement, certaines zones ont été exposées à d'autres types de perturbations. Par exemple, quelques exploitations du Limousin (zone C) ont été exposées à des épisodes de gel au moment de la méiose, alors que les exploitations de Bretagne (zone E) ont subi un automne pluvieux qui a retardé les semis.

***Tableau 7.2.1** : Variations relatives des indicateurs écoclimatiques sur la campagne 2010/2011 par rapport aux moyennes des indicateurs calculées sur la période 1983-2014.*

Variation des indicateurs écoclimatiques sur la campagne 2010/2011		Zone A (n=19)	Zone B (n=21)	Zone C (n=17)	Zone D (n=25)	Zone E (n=27)	Zone F (n=36)
Déficit hydrique	Semis-Levée	4%	-22%	23%	41%	-68%	26%
	Levée - Epi 1 cm	20%	36%	43%	25%	13%	10%
	Epi 1 cm - Méiose	41%	20%	21%	19%	20%	15%
	Méiose - Floraison	19%	17%	16%	15%	6%	12%
	Floraison - Maturité	-2%	7%	13%	-1%	-3%	-11%
Gel/ Froid	Levée - Epi 1 cm	-20%	-81%	-61%	-68%	-92%	-31%
	Epi 1 cm - Méiose	-100%	-100%	-100%	-100%	-100%	-100%
	Méiose - Floraison	-100%	-100%	130%	-100%	-87%	-2%
	Autour de la méiose	-100%	-100%	239%	-100%	-100%	12%
Excès de température	Méiose - Floraison	-100%	-100%	-100%	-100%	-100%	28%
	Floraison - Maturité	-25%	4%	-6%	-9%	-19%	-28%
Rayonnement	Méiose - Floraison	14%	19%	14%	10%	2%	6%
	Autour de la méiose	18%	17%	17%	12%	-2%	9%
Excès de pluies	Semis-Levée	-39%	-100%	-100%	-100%	269%	-100%
	Floraison - Maturité	55%	49%	-54%	-79%	-74%	-44%

La campagne 2011/2012 (Tableau 7.2.2) a d'abord été marquée par un automne doux et sec pour l'ensemble du territoire. La douceur, qui s'est poursuivie jusqu'au mois de janvier, a entraîné un avancement important des stades des cultures. Fin janvier, début février, un épisode de froid intense s'est déclaré en France. Les dégâts ont été localement importants, notamment dans les zones sans couverture neigeuse, comme en Moselle par exemple (zone F). Le froid a été d'autant plus stressant pour les plantes que ces dernières n'avaient pas réellement été endurcies à cause de la douceur du début de l'hiver. Les plantes ayant les stades les avancés (semis précoces) ont également été les plus exposés. D'autres épisodes de gel plus localisés (zone F notamment) se sont poursuivis au moment de la méiose. Le printemps a été plutôt caractérisé par des conditions humides et fraîches avec une offre en rayonnement plutôt limitée au moment de la méiose dans les zones A et E. Les apports azotés ont été bien valorisés et les risques d'échaudage thermique ont été faibles. La fin de cycle a également été pluvieuse avec des risques de verse localisés (zone A, C et D par exemple).

***Tableau 7.2.2** : Variations relatives des indicateurs écoclimatiques sur la campagne 2011/2012 par rapport aux moyennes des indicateurs calculées sur la période 1983-2014.*

Variation des indicateurs écoclimatiques sur la campagne 2011/2012		Zone A (n=19)	Zone B (n=21)	Zone C (n=17)	Zone D (n=25)	Zone E (n=27)	Zone F (n=36)
Déficit hydrique	Semis-Levée	8%	1%	0%	46%	11%	19%
	Levée - Epi 1 cm	21%	57%	43%	-16%	10%	-12%
	Epi 1 cm - Méiose	-14%	-2%	-7%	-10%	-5%	-18%
	Méiose - Floraison	-8%	1%	7%	1%	-6%	-3%
	Floraison - Maturité	-11%	2%	-1%	-17%	-19%	-19%
Gel/ Froid	Levée - Epi 1 cm	310%	472%	417%	305%	53%	143%
	Epi 1 cm - Méiose	-100%	-100%	-100%	-100%	-100%	-100%
	Méiose - Floraison	807%	-100%	101%	301%	-60%	413%
	Autour de la méiose	545%	-100%	-9%	148%	-52%	301%
Excès de température	Méiose - Floraison	-100%	-100%	-100%	-100%	-100%	-100%
	Floraison - Maturité	-7%	20%	-41%	-63%	-61%	-71%
Rayonnement	Méiose - Floraison	-4%	12%	7%	-2%	-7%	-1%
	Autour de la méiose	-6%	18%	6%	-3%	-9%	2%
Excès de pluies	Semis-Levée	159%	-100%	-100%	-100%	-100%	-100%
	Floraison - Maturité	83%	-38%	40%	62%	-62%	-53%

La campagne 2012/2013 (Tableau 7.2.3) a été principalement marquée par les conditions fraîches et humides auxquelles ont été exposées les exploitations françaises. Ces conditions humides se sont prolongées sur l'ensemble de la campagne culturale avec localement des risques d'ennoiement des parcelles et de verse (zone B notamment). Ces conditions ont entraîné une offre en rayonnement limitée et des risques de gel au moment de la méiose. Les températures se sont radoucies après la floraison et ont même entraîné des risques d'échaudage thermique dans la plupart des zones (sauf dans zone B).

***Tableau 7.2.3** : Variations relatives des indicateurs écoclimatiques sur la campagne 2012/2013 par rapport aux moyennes des indicateurs calculées sur la période 1983-2014.*

Variation des indicateurs écoclimatiques sur la campagne 2012/2013		Zone A (n=19)	Zone B (n=21)	Zone C (n=17)	Zone D (n=25)	Zone E (n=27)	Zone F (n=36)
Déficit hydrique	Semis-Levée	-26%	30%	-24%	-40%	-7%	-38%
	Levée - Epi 1 cm	-27%	-24%	1%	-5%	-37%	-1%
	Epi 1 cm - Méiose	-25%	-6%	14%	-4%	5%	-22%
	Méiose - Floraison	9%	-4%	9%	-9%	-6%	-5%
	Floraison - Maturité	8%	-9%	6%	0%	-3%	3%
Gel/ Froid	Levée - Epi 1 cm	-100%	-100%	-83%	-32%	-100%	-41%
	Epi 1 cm - Méiose	-100%	-100%	391%	-100%	-100%	-100%
	Méiose - Floraison	250%	-37%	94%	-66%	-42%	-100%
	Autour de la méiose	-100%	-59%	74%	-100%	-57%	-100%
Excès de température	Méiose - Floraison	84%	-100%	-100%	-100%	-100%	1092%
	Floraison - Maturité	27%	-33%	38%	65%	21%	75%
Rayonnement	Méiose - Floraison	0%	-7%	5%	-7%	-11%	4%
	Autour de la méiose	3%	-5%	5%	-9%	-13%	0%
Excès de pluies	Semis-Levée	-42%	-100%	126%	-100%	-18%	276%
	Floraison - Maturité	-30%	215%	35%	-5%	-58%	35%

La campagne 2013/2014 (Tableau 7.2.4) a également été marquée par une saison très humide. Le début de campagne et l'hiver ont notamment été très pluvieux avec des risques d'ennoiement et d'hydromorphie dans les sols ayant une mauvaise structure. Les températures ont été très douces, provoquant une avancée des stades mais limitant les risques de gel sauf localement (zone D). Les pluies se sont poursuivies au printemps et ont retardé les dates des apports azotés dans certaines zones. L'offre en rayonnement a été limitée mais les risques d'échaudage thermique ont également été faibles sur l'ensemble du

territoire. En fin de campagne, la poursuite des pluies a entraîné des risques de verse et de germination sur pied dans certaines zones.

***Tableau 7.2.4** : Variations relatives des indicateurs écoclimatiques sur la campagne 2013/2014 par rapport aux moyennes des indicateurs calculées sur la période 1983-2014.*

Variation des indicateurs écoclimatiques sur la campagne 2013/2014		Zone A (n=19)	Zone B (n=21)	Zone C (n=17)	Zone D (n=25)	Zone E (n=27)	Zone F (n=36)
Déficit hydrique	Semis-Levée	-37%	-65%	-51%	-57%	-99%	-62%
	Levée - Epi 1 cm	-41%	-38%	-35%	-43%	-113%	-30%
	Epi 1 cm - Méiose	6%	-5%	7%	-2%	-18%	0%
	Méiose - Floraison	-7%	-15%	-1%	-15%	-22%	-10%
	Floraison - Maturité	0%	0%	0%	-3%	-1%	5%
Gel/ Froid	Levée - Epi 1 cm	-100%	-100%	-100%	-100%	-100%	-100%
	Epi 1 cm - Méiose		-100%	-100%	-100%	-100%	-64%
	Méiose - Floraison	-54%	-100%	-60%	179%	-22%	-51%
	Autour de la méiose	-100%	-100%	-66%	276%	-20%	-90%
Excès de température	Méiose - Floraison	-100%	-100%	-100%	-100%	-100%	-100%
	Floraison - Maturité	-14%	-26%	-20%	-40%	-85%	-15%
Rayonnement	Méiose - Floraison	-10%	-16%	-2%	-11%	-16%	-10%
	Autour de la méiose	-9%	-23%	-3%	-16%	-19%	-5%
Excès de pluies	Semis-Levée	63%	997%	-100%	-100%	-100%	120%
	Floraison - Maturité	25%	-66%	153%	-2%	-88%	50%

Titre de la thèse : Robustesse du rendement du blé tendre face aux perturbations abiotiques et biotiques : cadre méthodologique et leviers agronomiques

Auteur : Nicolas URRUTY

Directeur de thèse : Christian HUYGHE **Encadrement Agrosolutions** : Delphine TAILLIEZ-LEFEBVRE

Résumé

Dans un contexte d'aléas et d'incertitudes croissants, les systèmes agricoles doivent être performants, non seulement dans des conditions climatiques, biotiques et économiques moyennes ou normales, mais aussi quand les perturbations sont plus importantes. Récemment, de nombreux concepts ont été développés pour étudier la durabilité des systèmes agricoles dans des environnements changeants. Celui de robustesse a été plus particulièrement mobilisé dans les systèmes d'élevage ; son transfert et son opérationnalité aux systèmes de grandes cultures restent limités. L'objectif de la thèse est alors de proposer un cadre d'évaluation de la robustesse qui soit opérationnel et utilisable en conditions de grandes cultures. Nous nous sommes focalisés sur la culture du blé tendre et avons défini la robustesse comme la capacité d'un système agricole à maintenir ses performances de rendement malgré l'apparition de perturbations. Un modèle économétrique défini à l'échelle du système de culture a été développé pour évaluer cette robustesse face à des conditions météorologiques et des niveaux de pression maladies changeants. Il a été appliqué sur 145 exploitations agricoles françaises engagées, sur une base volontaire, dans le réseau de fermes DEPHY-ECOPHYTO ; 2300 parcelles de blé ont ainsi pu être enquêtées sur la période 2011-2014. Les résultats montrent que la robustesse aux perturbations abiotiques et biotiques varie d'un système de culture à l'autre. Les systèmes les plus robustes (respectivement, les moins robustes) aux variations des perturbations abiotiques ont pu être identifiés, en tenant compte simultanément des niveaux de rendement atteints en conditions climatiques moyennes et de la sensibilité de ces rendements à des variations climatiques. Les caractéristiques respectives de ces différents profils de robustesse en termes de pratiques agronomiques ont ensuite été étudiées. Alors que les situations de rendements ''élevés'' versus ''faibles'' s'expliquent surtout par des pratiques agronomiques dites d'intensification, ce sont surtout des variables dites de flexibilité, c'est-à-dire ayant trait à la souplesse de mise en œuvre des pratiques agricoles, qui sembleraient expliquer la robustesse versus la sensibilité aux perturbations abiotiques. Au-delà de l'intérêt de l'approche *per se* pour comprendre et augmenter la robustesse des systèmes de culture aux changements climatiques, la méthodologie développée présente aussi l'avantage de pouvoir être appliquée à d'autres performances et/ou d'autres aléas. Elle pourrait être utilisée pour mieux communiquer auprès des agriculteurs et leur environnement sur l'importance à dépasser une vision uniquement limitée aux performances moyennes en intégrant la sensibilité de celles-ci aux changements, en premier lieu le changement climatique.

Thesis title: Wheat yield robustness to abiotic and biotic perturbations: methodological framework and agronomic drivers

Abstract

Given increasing risks and uncertainties surrounding the future of agriculture, farming systems need to perform well both in average conditions and in situations presenting substantial variations in weather patterns, pest pressures, and economic factors. A number of different concepts have been developed in recent years to assess the sustainability of agricultural systems within a context of global change. Among these concepts, the notion of *robustness* has been used primarily in the animal sciences, but its empirical operationalization remains a challenge, particularly with regard to arable cropping systems. The aim of this thesis is to propose a methodological framework for assessing robustness which is operational for arable conditions. Focusing on wheat production, the thesis defines robustness as the ability of a cropping system to maintain yield performances despite the presence of perturbations. An econometric model defined at the cropping system level is used to assess yield robustness in the face of changing weather conditions and fungal disease pressures. The methodological framework is then applied to data from 145 French wheat-growing farms participating in a pesticide-reduction plan known as DEPHY-ECOPHYTO; in total, the data relate to 2,300 wheat plots surveyed over the period 2011-2014. The results show that yield robustness varies widely from one cropping system to another. Cropping systems showing the most and the least robustness to abiotic perturbations were identified on the basis of yield performances under both normal and changing weather conditions. Agricultural characteristics of these different patterns of yield robustness were then considered on the basis of three categories of agronomic practices: management intensification practices, rotation practices, and flexibility practices. While several management intensification and crop rotation practices differentiate high *versus* low wheat yield cropping systems, it appears to be flexibility practices that distinguish robust *versus* sensitive cropping systems. Beyond the interest of this approach *per se* to understand and improve the robustness of agricultural systems in the face of climate change, this methodological framework could also be used to assess other performances and/or risks. In addition, this approach may provide a useful way to improve communication with farmers and stakeholders with respect to the significance of shifting from a perspective based on average results to a broader view taking into account the sensitivity of cropping system performance to changing conditions, and above all to climate change.