



**HAL**  
open science

## Santé des plantes dans un réseau expérimental sur des variétés de blé d'hiver rustiques: analyses de risque

Serge Savary, Céline Jouanin, Irène Felix, Emmanuelle Gourdain, François Piraux, Francois Brun, L. Willocquet

### ► To cite this version:

Serge Savary, Céline Jouanin, Irène Felix, Emmanuelle Gourdain, François Piraux, et al.. Santé des plantes dans un réseau expérimental sur des variétés de blé d'hiver rustiques: analyses de risque. Innovations Agronomiques, 2017, 59, pp.63-79. 10.15454/1.5138436922221646E12 . hal-01675817

**HAL Id: hal-01675817**

**<https://hal.science/hal-01675817>**

Submitted on 4 Jan 2018

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

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



Distributed under a Creative Commons Attribution - NonCommercial - NoDerivatives 4.0 International License

## Santé des plantes dans un réseau expérimental sur des variétés de blé d'hiver rustiques : analyses de risque

Savary S.<sup>1</sup>, Jouanin C.<sup>1</sup>, Félix I.<sup>2</sup>, Gourdain E.<sup>3</sup>, Piraux F.<sup>3</sup>, Brun F.<sup>4</sup>, Willocquet L.<sup>1</sup>

<sup>1</sup> AGIR, INRA, Université de Toulouse, INPT, INP- EI PURPAN, F-31326 Castanet-Tolosan cedex

<sup>2</sup> ARVALIS, Domaine du Chaumoy, F-18570 Le Subdray

<sup>3</sup> ARVALIS, Station expérimentale, F-91720 Boigneville

<sup>4</sup> ACTA, 24 Chemin de Borde Rouge, Auzeville, CS52627, F-31326 Castanet-Tolosan cedex

**Correspondance** : serge.savary@inra.fr

### Résumé

Un vaste réseau d'expérimentations au champ a été conduit pendant plusieurs années à travers la France pour identifier les combinaisons de variétés cultivées de blé d'hiver et d'itinéraires techniques en vue d'atteindre le double objectif de durabilité écologique et de viabilité économique. Cet objectif implique notamment un processus d'extensification chimique, au travers duquel les intrants chimiques, dont les fongicides, sont réduits pour optimiser les performances, notamment économiques, de la production végétale. Peu d'informations sont disponibles pour documenter, dans ce réseau, la variation des niveaux de maladie multiples. Le contrôle des niveaux de maladies constitue pourtant une étape nécessaire à un processus d'extensification chimique. Cet article fournit une description des intensités des maladies du blé dans un ensemble de 101 expérimentations totalisant 3525 parcelles individuelles de blé, pendant huit années successives (2003-2010). Les maladies considérées sont la rouille brune (BR, *Puccinia triticina*), la rouille jaune (YR, *Puccinia striiformis*), la fusariose des épis (FHB, *Fusarium graminearum*, *F. culmorum*, et *F. avenaceum*), l'oïdium (PM, *Blumeria graminis*), et la septoriose (STB, *Zymoseptoria tritici*). Les intensités de maladies ont été représentées par des variables binaires (épidémie ou non-épidémie). Trois syndromes de maladies ont été identifiés, qui correspondent à des profils de niveau de maladie distincts. Trois groupes de variétés ont également été identifiés, qui se distinguent par leurs réponses aux maladies. Les résultats indiquent que les années climatiques, les variétés de blé et les itinéraires techniques, dans cet ordre décroissant, définissent le risque d'épidémie dans le pathosystème multiple des maladies du blé en France. Des variables synthétiques prenant en compte le climat au printemps et au début de l'été ont été construites. Les associations entre variables climatiques et risques d'épidémies identifiées sont en accord avec les connaissances sur les effets du climat sur les composants de ce pathosystème multiple. Cet article met en avant la valeur de jeux de données à grande échelle pour l'évaluation de la santé végétale et l'utilité d'une démarche analytique permettant d'identifier les facteurs de risques pour les décisions tactiques et stratégiques, pour la gestion de la santé végétale.

**Mots-clés** : Agriculture durable, Analyse de correspondance, Blé, Données catégoriques, Extensification agricole, Facteurs de risque, Gestion des cultures, Pathosystème multiple, Régression logistique, Santé des plantes.

### **Abstract: Plant health in an experimental network on rustic winter wheat varieties: risk analyses**

A large network of field experiments has been conducted over several years across France to identify combinations of winter wheat cultivars and management leading to achieve the double objective of ecological sustainability and economic viability. Little information is available to document the variation

in multiple disease levels, a necessary step towards a chemical extensification process, in wheat networked experiments. This article provides a description of disease intensities in a set of 101 experiments totalling 3525 individual wheat plots over eight successive years (2003–2010). The diseases considered are brown rust (BR, *Puccinia triticina*), yellow rust (YR, *Puccinia striiformis*), fusarium head blight (FHB, *Fusarium graminearum*, *F. culmorum*, and *F. avenaceum*), powdery mildew (PM, *Blumeria graminis*), and septoria tritici blotch (STB, *Zymoseptoria tritici*). Disease intensities were represented by binary variables (epidemic vs non-epidemic), and three disease syndromes were identified, which correspond to different disease profiles. Three variety groups were also identified, according to their responses to diseases. The results indicate that climatic years, wheat varieties, and crop management, in this decreasing order, define disease epidemic risk in the multiple wheat-diseases pathosystem. The associations between climate variables and epidemic risks identified here conform to disease-specific knowledge of climate effects on the components of the pathosystem. This report emphasises the value of large scale data in crop health assessment and the usefulness of a risk factor approach for both tactical and strategic decisions for crop health management.

**Keywords:** Agricultural extensification, Categorical data, Correspondence analysis, Crop health, Crop management, Logistic regression, Multiple pathosystem, Risk factors, Sustainable agriculture, Wheat

## Introduction

Un large réseau d'expérimentations au champ a été conduit pendant plusieurs années dans différentes régions de France pour identifier des combinaisons de variétés de blé d'hiver et de pratiques culturales qui permettraient atteindre le double objectif de durabilité écologique et de viabilité économique (Bouchard et al., 2008 ; Loyce et al., 2008 ; 2012). Plusieurs rapports concernant ce projet important initié par des améliorateurs des plantes (Doussinault, 1998 ; Brancourt-Hulmel et al., 2003) concernent le rendement (Loyce et al., 2008 ; 2012) et les performances économiques (Bouchard et al., 2008 ; Loyce et al., 2012).

Les variétés de blé rustique d'hiver peuvent être définies comme des variétés qui (1) ont des performances de rendement approchant celles des meilleures variétés à haut rendement, dans des conditions d'apports en engrais modérés, (2) produisent un grain de bonne qualité (c'est-à-dire, avec une teneur en protéines élevée) et (3) qui portent des résistances partielles multiples vis-à-vis des principales maladies du blé. Un objectif important de ce réseau expérimental était donc d'évaluer dans quelle mesure les maladies pouvaient être contrôlées par certaines variétés dans certaines conditions de pratiques culturales : c'est un point clé de l'extensification chimique, c'est-à-dire, de la réduction de l'usage d'intrants chimiques, notamment de pesticides, dans une perspective d'optimisation économique et environnementale. Si, dans un premier temps, certaines variétés mises en culture avec des niveaux réduits d'engrais (spécialement azoté) et sous une protection chimique limitée amenaient à des niveaux de maladie réduits, alors de telles combinaisons (variété x pratique culturale) pourraient être envisagées comme des points d'entrée pour une extensification chimique. Si, dans un second temps, de telles combinaisons pouvaient mener à des rendements satisfaisants et à une bonne qualité du grain, le double objectif de durabilité écologique et économique serait alors à portée.

Plusieurs rapports indiquent que tel est le cas (Félix et al., 2002 ; Bouchard et al., 2008 ; Loyce et al., 2008 ; 2012). Une analyse fondée sur une période de deux années (2001–2002) indique que les intensités de maladies (rouille brune, rouille jaune et septoriose-tritici) étaient réduites avec l'intensification d'intrants chimiques et avec le niveau de résistance des variétés (Loyce et al., 2008). Cependant, très peu d'information quantitative existe quant aux intensités effectives des maladies, leurs variations et distributions, leurs combinaisons possibles en syndromes de maladies, et quant aux principaux facteurs déterminant les risques d'épidémies multiples. L'objectif général de cet article est donc de fournir une information sur la première étape de l'extensification chimique, c'est-à-dire, sur le

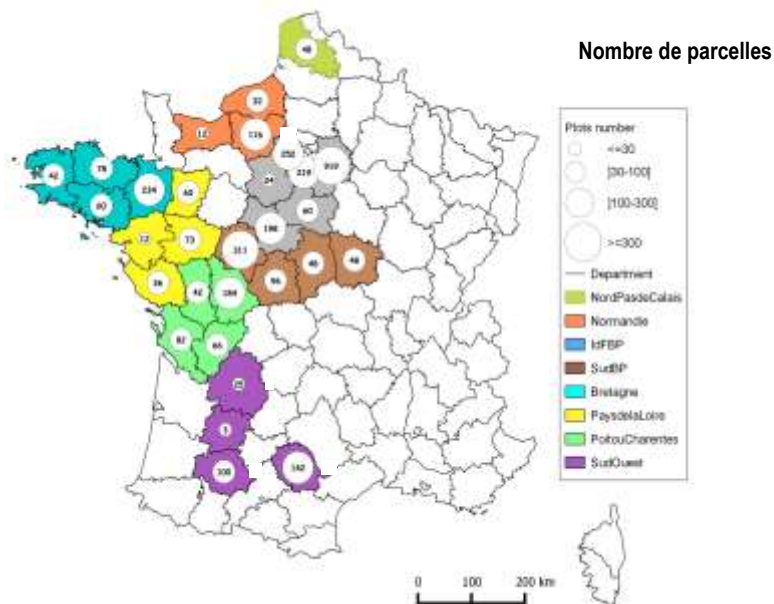
niveau de réduction de maladies atteint par des variétés de blé rustiques d'hiver à des niveaux d'intensification spécifiques.

Un premier objectif spécifique est de fournir une information quantitative relative aux intensités de cinq maladies : la rouille brune (*Puccinia triticina*), la rouille jaune (*Puccinia striiformis*), la fusariose des épis (qui implique un complexe d'agents pathogènes, incluant : *Fusarium graminearum*, *F. culmorum*, et *F. avenaceum* ; Jennings et al., 2004 ; Nielsen et al., 2011), l'oïdium (*Blumeria graminis*) et la septoriose (tritici ; *Zymoseptoria tritici*). Cet objectif inclut l'identification de syndromes de maladies, de groupes de réponses variétales aux maladies et la quantification des relations entre (1) maladies et syndromes de maladies et (2) variétés, groupes de variétés, pratiques culturales et années climatiques. Un second objectif vise à analyser l'effet du climat sur les intensités de maladies. Un troisième objectif, méthodologique, est d'évaluer une approche générique pour analyser de grands jeux de données, qui comportent une information quantitative et qualitative et un niveau variable de précision des données. Cette approche a été mise en œuvre précédemment (Savary et al., 1994 ; 2006 ; Avelino et al., 2006 ; Zhang et al., 2006). Par ailleurs, la notion de facteur de risque, tellement utilisée dans le domaine de la santé publique, a été rarement utilisée dans celui de la santé végétale (Savary et al., 2011). Cet article en fournit une illustration dans le cas du blé.

## 1. Matériels et méthodes

### 1.1 Réseau expérimental

Une large gamme de variétés de blé tendre d'hiver a été évaluée dans un réseau d'essais au champ établis dans différentes régions de France (Figure 1), en considérant quatre itinéraires techniques.



**Figure 1** : Répartition du réseau d'expérimentations sur les variétés de blé rustiques - 2003-2010. La carte décrit la répartition de 3525 parcelles individuelles correspondant aux 101 expérimentations conduites en 2003-2010. Les couleurs correspondent à différentes zones expérimentales.

Ces essais ont été conduits pendant plusieurs années et nous présentons ici les résultats des essais menés pendant la période 2003-2008, sur un total de 45 variétés. Les itinéraires techniques (CMGT) mis en place, CMGT1 à CMGT4, ont été décrits de manière détaillée par ailleurs (Rolland et al., 2003 ; Loyce et al., 2008 ; 2012 ; Bouchard et al., 2008). Ils représentent quatre niveaux d'extensification agricole, principalement chimique, depuis CMGT1, très intensif, jusqu'à CMGT4, beaucoup plus extensif. Le raisonnement d'intensification et d'extensification est fondé sur CMGT2, qui représente les recommandations locales pour l'obtention de hauts rendements. Les objectifs de ces différents CMGT peuvent être résumés ainsi :

- CMGT2 vise à la réalisation locale d'un rendement accessible (c'est-à-dire sans dégâts de ravageurs, maladies ou adventices) sous des conditions quasi-optimales de nutrition minérale : CMGT2 correspond à une densité de semis élevée (150-400 graines/m<sup>2</sup> ; d'où une interception du rayonnement maximisée aux stades de développement initiaux), des intrants azotés élevés (en général 160 kg/ha en trois applications ; d'où un rendement accessible maximisé), des applications de fongicides fréquentes (une à trois applications ; d'où un rendement accessible atteint) et à l'application d'un régulateur de croissance si nécessaire (une application au maximum ; d'où un risque de verse limité).
- CMGT1 vise à la maximisation du rendement : les intrants azotés de CMGT2 sont accrus de 30 kg/ha ; les applications fongicides sont systématiques (deux ou trois applications) et un régulateur de croissance est appliqué une ou deux fois.
- CMGT3 vise un rendement plus faible que dans CMGT2 : la densité de semis est diminuée de 40% ; l'apport azoté est réduit de 30 kg/ha ; les régulateurs de croissance sont rarement utilisés ; l'utilisation de fongicides est limitée (une application à une demi-dose au stade sortie des épis) ; et les régulateurs de croissance ne sont pas utilisés.
- CMGT4 vise à une réduction de l'usage des intrants chimiques : la densité de semis est similaire à celle de CMGT3 ; l'apport azoté est réduit de 60 kg/ha par rapport à CMGT2 ; les régulateurs de croissance et fongicides ne sont pas utilisés.

CMGT2 étant fondé sur des recommandations locales, les autres CMGT sont également définis localement. De ce fait la gamme des niveaux de gestion de cultures peut varier d'un essai à l'autre.

### *1.2 Dispositifs expérimentaux et collecte des données*

Les dispositifs expérimentaux étaient variables d'un essai à l'autre, mais un dispositif typique correspondait à un split-plot avec comme unité principale, l'itinéraire technique et comme sous-unité, la variété (Loyce et al., 2008), avec quatre, parfois trois, répétitions. Certains essais ont cependant été menés suivant des dispositifs en blocs aléatoires, ou en strip-plot. Un grand nombre d'essais n'ont inclus que les niveaux CMGT2 et CMGT3. Le nombre de variétés était également variable suivant l'essai. Les analyses réalisées ici incluent les essais avec au moins : (1) trois variétés, (2) deux niveaux de gestion CMGT et (3) trois répétitions. Le nombre de parcelles élémentaires était donc variable suivant les essais et les années. La taille des parcelles élémentaires était également variable, comprise entre 15 et 68 m<sup>2</sup>.

Le rendement a été mesuré dans chaque parcelle élémentaire. Les niveaux des maladies ont été mesurés suivant différentes méthodes, incluant des mesures de sévérité (proportion de surface de feuille malade), d'incidence (proportion de feuilles malades) pour les maladies foliaires et des mesures d'incidence de maladie pour les maladies affectant les épis. Des notations ont été effectuées pour cinq maladies : la rouille brune (BR), la rouille jaune (YR), la fusariose des épis (FHB), l'oïdium (PM), et la septoriose (tritici ; STB).

### 1.3 Données analysées

Le réseau d'essais a généré un jeu de données très vaste, à partir duquel un jeu de données a été extrait suivant deux critères : (1) seuls les essais où des notations de maladies avaient été réalisées ont été retenus et (2) ont été retenus les essais pour lesquels les notations de maladies avaient été effectuées entre les stades de développement « gonflement » et « remplissage du grain » (stades 45 à 85 ; Zadoks et *al.*, 1974). Les informations ayant trait aux maladies ont ensuite été standardisées en exprimant BR, YR, PM et STB en termes de sévérité (% de surface de feuilles malade) et FHB en termes d'incidence (% des épis malades).

Le jeu de données obtenu et utilisé ici pour les analyses, inclut 101 essais conduits au cours de huit années successives (2003-2010) et correspond à 3525 parcelles élémentaires.

### 1.4 Données climatiques

Du fait du très grand nombre d'essais dans des localisations très différentes (certains dans des unités expérimentales, mais beaucoup dans des parcelles agricoles), les données climatiques de chaque essai n'ont pas été collectées. Nous avons utilisé la base de données spatialisée SAFRAN de Météo-France. Les données climatiques sont interpolées sur une grille de 8 x 8 km avec un système d'analyse atmosphérique à méso-échelle (Durand et *al.*, 2009) qui a été considéré comme robuste (Quintana-Seguí et *al.*, 2008). Les essais n'étant pas géo-référencés et étant localisés à plus de 50 km du chef-lieu de département le plus proche, les données journalières climatiques correspondant au chef-lieu du département le plus proche ont été utilisées.

Les évaluations de maladie considérées dans l'analyse ont été effectuées entre les stades gonflement et remplissage du grain. Les mesures de maladies à de tels stades tardifs rendent probablement bien compte du développement de maladie au printemps, mais ne représentent sans doute que très partiellement les premières phases du développement épidémique des maladies, quand l'inoculum primaire entre en jeu, est mobilisé et initie les premières infections. Nous avons déterminé des variables climatiques synthétiques représentant la dernière partie de la saison culturale, c'est-à-dire de mars jusqu'à fin juin. Par la suite, chaque essai est représenté par des variables climatiques synthétiques au cours de ces quatre mois : Tn (moyenne des températures minimales quotidiennes), Tx (moyenne des températures maximales quotidiennes), RR (pluviométrie - moyenne de la pluviométrie quotidienne), FRD (pluviosité - fraction de jours pluvieux au cours de la période de quatre mois), RH (moyenne de l'humidité relative moyenne quotidienne) et GR (moyenne du rayonnement quotidien). Ces variables climatiques synthétiques sont ensuite converties en variables catégoriques représentant leurs quartiles : TxQUART, TnQUART, RRQUART, GRQUART, RHQUART, et FRDQUART.

### 1.5 Stratégie d'analyse

Le jeu de données représente un très grand nombre de variétés de blé, certaines impliquées dans de nombreux essais sur une grande fraction de la période considérée, alors que d'autres variétés n'ont été testées que dans un nombre limité d'essais. Par ailleurs, le jeu de données concerne cinq maladies du blé, dont certaines sont très fréquemment rencontrées, alors que d'autres ne sont documentées que dans un nombre restreint d'essais et dans un nombre limité de parcelles élémentaires de ces essais.

En s'écartant des approches d'analyse utilisées précédemment sur des données similaires (Bouchard et *al.*, 2008 ; Loyce et *al.*, 2008), nous avons considéré la parcelle élémentaire comme unité statistique, ce qui permet la mise en oeuvre d'approches multivariées. Les données ont été collectées pendant une longue période, par différents groupes, et avec différentes orientations. La catégorisation des données a été considérée comme un moyen principal pour réduire le bruit des données et stabiliser les variances (Savary et *al.*, 1995).

## 1.6 Etapes d'analyse

Une première étape de l'analyse considère les larges variances des intensités de maladies mesurées et consiste à définir une transformation de données appropriée. Cette étape nécessite la considération des distributions de fréquence des intensités de maladie, en vue de leur catégorisation (Savary et al., 1995).

Dans une seconde étape, les syndromes de santé végétale sont identifiés. Pour cela, les données de maladies catégorisées pour chacune des 3525 parcelles sont utilisées en considérant chacune des parcelles comme une réalisation d'un des plusieurs syndromes de maladie possibles affectant une population. Cette étape implique une classification ascendante hiérarchique avec une métrique de chi-deux, avec le critère de Ward (Lames et McCulloch, 1990 ; Wilkinson et al., 2007).

La troisième étape considère les variétés de blé testées et leurs réponses multiples aux maladies. La réponse de maladie d'une variété donnée peut être vue comme une fonction de son génotype, fixé, et de l'année climatique, elle, variable. Cette réponse peut être, de plus, affectée par les itinéraires techniques, spécialement parce que ceux-ci comportaient une utilisation variable, parfois élevée, de fongicides. Idéalement, cette analyse devrait impliquer des parcelles sans application de fongicides et aurait pu être conduite sur les parcelles conduites selon le niveau CMGT4. CMGT4 n'est cependant représenté que par 321 parcelles dans le jeu de données obtenu. Un examen des parcelles sous CMGT4 indique de plus que certaines variétés sont très peu représentées ou absentes dans ce CMGT. L'analyse a donc été réalisée sur les parcelles appartenant au niveau CMGT3 (1572 parcelles), où l'utilisation de fongicides était relativement faible et où les cinq maladies étaient notées. Une classification ascendante hiérarchique a été réalisée sur la base des moyennes et écart-types des cinq maladies dans toutes les parcelles conduites sous CMGT3 avec une distance Euclidienne et le critère de Ward (Lames et McCulloch, 1990 ; Wilkinson et al., 2007).

Dans une quatrième étape, le niveau et la signification des associations entre les méta-variables générées (syndromes de maladie et groupes de variétés), conjointement avec des variables individuelles (niveaux individuels de maladies et années climatiques), sont considérés. Ces associations ont été évaluées en conduisant une série de tests de chi-deux sur les tableaux de contingences correspondants (Benzécri, 1973).

La cinquième étape consiste à générer une représentation globale des liens multiples entre les années climatiques et les niveaux de maladies, les variétés et les groupes de variétés et les itinéraires techniques suivant une analyse de correspondance multiple (Benzécri, 1973 ; Greenacre, 1984 ; Savary et al., 1995).

Dans une sixième étape, des analyses de correspondance multivariées sont de nouveau conduites, ici pour représenter de manière synthétique les associations multiples entre les cinq maladies et les variables climatiques. L'analyse de correspondance multiple qui synthétise le mieux ces associations implique TxQuart, TnQUART et RRQUART, et c'est cette analyse qui a été retenue.

Dans une septième et dernière étape, la régression logistique (Harrell 2001 ; Steinberg et Colla 2007 ; Savary et al., 2011) a été utilisée pour analyser les relations entre la présence d'épidémie et les variables climatiques synthétiques. Pour chaque maladie, le modèle suivant a été utilisé :

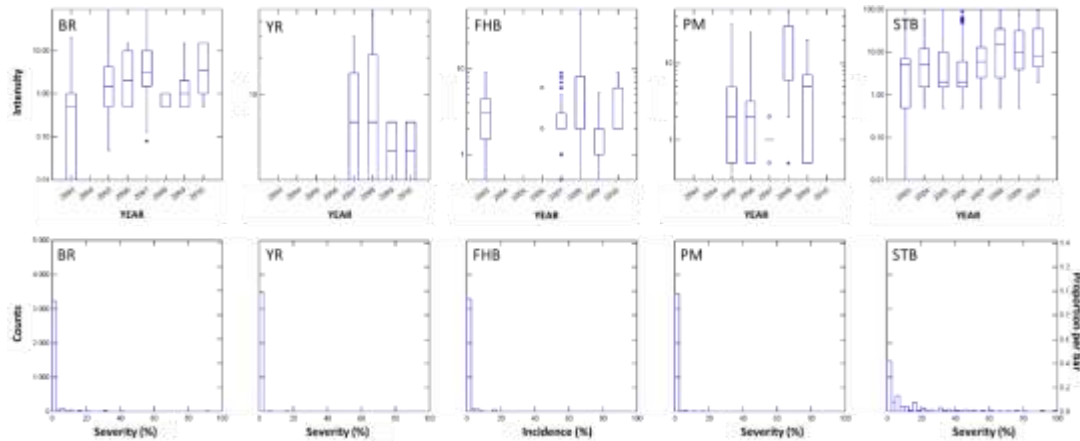
$$\text{Ln}[P(\text{diseaseBIN} = 1) / (1 - P(\text{diseaseBIN} = 1))] = \alpha + \sum \beta_i \text{CLIM}_i$$

où diseaseBIN est l'intensité de maladie binarisée, avec BIN = 0 représentant une non-épidémie et BIN = 1 représentant une épidémie ; CLIM<sub>i</sub> est un vecteur (Tn, Tx, RR, GR, RH, et FRD) de variables climatiques continues ;  $\alpha$  est une constante et  $\beta_i$  est un vecteur de paramètres. Pour cette analyse, chaque maladie est considérée séparément et la probabilité d'occurrence d'une épidémie est considérée comme le résultat de la combinaison des variables climatiques, considérées comme des prédicteurs d'épidémie.

## 2. Résultats

### 2.1 Distribution de fréquences des intensités de maladie

Les distributions de fréquences (Figure 2) des cinq maladies sont très asymétriques, avec une grande proportion de parcelles où les intensités de maladies sont très faibles ou nulles. Des variations importantes d'intensité de maladies sont observées entre les différentes années climatiques (Figure 2).



**Figure 2** : Box-plots selon les années et distributions de fréquence des différentes maladies du blé. BR: rouille brune, YR: rouille jaune, FHB: fusariose, PM: oïdium, STB: septoriose. **Haut**: variations des intensités de maladies (BR, YR, PM, STB : sévérités ; FHB : incidence) selon les années. Abscisses : années, ordonnées : intensités de maladie (échelle logarithmique base 10). **Bas**: distributions de fréquence des intensités de maladie non-transformées dans 3525 parcelles de blé.

La rouille brune (BR) est présente la plupart des années, sauf en 2004, avec un niveau maximum en 2007. La rouille jaune (YR) est observée seulement au cours de quatre années consécutives (de 2007 à 2010) mais seulement sur un total de 55 parcelles, avec des sévérités inférieures ou égales à 2%. La fusariose (FHB) est observée de manière inégale également, souvent avec de grandes variances, comme en 2008, où la maladie atteint des niveaux maxima. L'oïdium (PM) est observé seulement au cours de quelques années, à des niveaux bas (médianes de quelques %). En revanche, la septoriose (STB) est observée régulièrement tous les ans, avec des médianes de sévérité de l'ordre de 10% et également avec des variances importantes.

La Figure 2 (haut) indique donc de très grandes variations à la fois dans les niveaux des cinq maladies considérées et dans leurs associations, à l'échelle du réseau expérimental, selon les années. Le bas de la Figure 2 présente les distributions de fréquences des intensités de maladies (exprimées en sévérités pour BR, YR, PM et STB, et en incidences pour FHB). Toutes les distributions sont très fortement asymétriques, avec d'importantes implications pour les analyses statistiques qui suivent.

### 2.2 Transformation des intensités de maladie en variables binaires

Les distributions de fréquences observées (Figure 2) des intensités de maladies mènent à considérer l'information associée aux niveaux de maladie de manière similaire à des études antérieures (Savary et al., 1994 ; 2006 ; Avelino et al., 2004 ; 2006 ; Zhang et al., 2006). L'approche adoptée pour ce type de traitement consiste à considérer des catégories, qui remplacent les données quantitatives originales, mais qui rendent compte de la variabilité des mesures quantitatives (Savary et al., 1995). Dans de tels grands jeux de données, le niveau de maladie est généralement associé à deux processus successifs : l'établissement de la maladie et l'intensification de maladie dans la population hôte (Lenné et Jeger



1994 ; Savary et al., 1994). L'information concernant l'intensification de maladie peut être très utile car elle reflète les conditions qui ont pu la favoriser ou la limiter ; cependant, il ne peut y avoir intensification sans établissement préalable de la maladie dans un peuplement végétal.

L'examen des données brutes (résumées dans la Figure 2) indique que de larges variations de notations de maladie pouvaient exister entre années et entre sites. Cette variation peut être associée à des différences quant aux maladies effectivement prises en compte, de même qu'à des différences dans les méthodes de mesure de maladie (Reddy et al., 2011). Les distributions de fréquences de la Figure 2 indiquent, d'autre part, que la présence de maladie (excepté pour STB) à des niveaux supérieurs à 5% d'intensité est rare dans le jeu de données analysé. Il a donc été décidé de se concentrer sur l'établissement plutôt que sur l'intensification des épidémies et, de ce fait, de représenter les données de maladies sous forme binaire (De Wolf et al., 2003 ; Esker et al., 2006). Dans ce cas, 0 indique l'absence ou le faible niveau de maladie et 1 indique un niveau de maladie supérieur à un seuil faible de maladie. Les seuils ont été calculés ainsi :  $t = \mu - 0.05 (s/\mu)$  où «  $\mu$  » est la moyenne arithmétique de l'intensité de maladie, et «  $s$  » est l'écart type. Les valeurs de seuils obtenues sont : 0.102, 0.076, 0.663, 0.233, et 12.91%, pour BR, YR, FHB, PM, et STB, respectivement. Les niveaux de maladie au-dessus ou en dessous de ces seuils sont par la suite respectivement dénommés « épidémies » ou « non épidémies » (Esker et al., 2006).

### 2.3 Caractérisation de syndromes de maladies

Une classification ascendante hiérarchique portant sur l'ensemble des 3525 parcelles représentées par leurs niveaux de maladie binarisés mène à considérer trois groupes de profils de dégâts (Savary et al., 2006). Un très grand groupe X (2273 parcelles) est associé à la présence combinée, simultanée, de maladies dans une même parcelle. C'est seulement dans ce groupe X que des épidémies de rouille jaune, de fusariose et d'oïdium sont observées. Le groupe X est associé à des épidémies possibles de rouille brune (BRBIN = 1 dans 279 cas) et de rouille jaune (YRBIN = 1 dans 55 cas), des épidémies fréquentes de fusariose (FHBIN = 1 dans 515 cas), des épidémies possibles d'oïdium (PMBIN = 1 dans 215 cas) et des épidémies possibles de septoriose (STBIN = 1 dans 418 cas). Un second groupe, Y (543 parcelles) est identifié, qui est associé de manière prédominante à des épidémies de rouille (BR = 1 dans 440 cas). Le troisième groupe, Z (709 parcelles), est associé de manière prédominante aux épidémies de septoriose (STB = 1 dans 634 cas). Ainsi, les trois groupes de syndromes de maladies identifiés correspondent à des profils de dégât distincts : le premier (groupe X) correspond à la présence probable d'épidémies multiples de maladies différentes du blé, le second (groupe Y), à la présence d'épidémies de rouille brune et le troisième (Z), à la présence d'épidémies de septoriose.

### 2.4 Caractérisation de groupes variétaux à partir des données pour l'itinéraire CMGT3

Les données brutes correspondant à l'itinéraire technique CMGT3 constituent une base acceptable pour comparer les variétés quant à leurs niveaux de maladies : cet itinéraire est le mieux représenté dans le jeu de données et il correspond à un emploi limité de fongicides. Trois groupes de variétés sont identifiés à partir d'une classification ascendante hiérarchique impliquant les moyennes et les écarts-types de niveaux de maladies (sévérité ou incidence) pour les cinq maladies :

- VARGROUP-A consiste en 16 variétés de blé, associées à des niveaux de maladies modérés ou faibles, sauf pour la rouille jaune (YR) où les niveaux sont modérés ;
- VARGROUP-B consiste en 12 variétés, associées à des niveaux modérés ou faibles de rouille brune (BR), rouille jaune (YR) et fusariose (FHB), mais à des niveaux modérés d'oïdium (PM) et de septoriose (STB) ;

- VARGROUP-C consiste en 17 variétés, associées à des niveaux comparativement plus forts de rouille brune (BR), rouille jaune (YR), fusariose (FHB) et septoriose (STB), et à des niveaux modérés d'oïdium.

Ces différences entre groupes variétaux sont indiquées dans le Tableau 1, où la variable VARGROUP (A, B, ou C) est croisée deux à deux avec les variables de maladies binarisées (BRBIN, YRBIN, FHBBIN, PMBIN, STBBIN) considérées successivement. Les valeurs de  $\chi^2$  rapportées dans le Tableau 1 permettent de rejeter l'hypothèse nulle d'indépendance entre groupes de variétés (VARGROUP) et maladie, pour chacune des cinq maladies considérées ( $\chi^2 = 6.41, 24.06, 24.45, 86.90, 321.14$  ;  $P < 0.05$ ). L'hypothèse d'indépendance entre syndromes de maladies (X, Y, ou Z) et variétés (VARGROUP A, B, C) est également rejetée ( $\chi^2 = 134.67, P < 0.001$ ).

**Tableau 1** : Tests de chi-deux entre niveaux de maladies du blé (représentés par des catégories binaires), itinéraires techniques, groupes variétaux, et années climatiques

Variable X	Variable Y	Chi-deux de Pearson	ddl	P
ANNEE	BRBIN	1401.81	7	< 0.001
	YRBIN	87.01	7	< 0.001
	FHBBIN	757.95	7	< 0.001
	PMBIN	203.21	7	< 0.001
	STBBIN	384.55	7	< 0.001
	CLUSDISEASE	1005.13	14	< 0.001
CMGT	BRBIN	31.87	3	< 0.001
	YRBIN	50.21	3	< 0.001
	FHBBIN	40.38	3	< 0.001
	PMBIN	21.22	3	< 0.001
	STBBIN	82.06	3	< 0.001
	CLUSDISEASE	32.48	6	< 0.001
CLUSDISEASE	BRBIN	1621.88	2	< 0.001
	YRBIN	30.06	2	< 0.001
	FHBBIN	289.59	2	< 0.001
	PMBIN	115.88	2	< 0.001
	STBBIN	1624.50	2	< 0.001
	VARGROUP	CLUSDISEASE	134.67	4
VARGROUP	BRBIN	6.41	2	0.041
	YRBIN	24.06	2	<0.001
	FHBBIN	24.45	2	< 0.001
	PMBIN	86.90	2	< 0.001
	STBBIN	321.14	2	< 0.001
	CLUSDISEASE	134.67	4	< 0.001

ddl : degrés de liberté du test de Chi-deux ; P : probabilité associée au Chi-deux de Pearson ; ANNEE : année climatique ; CMGT : itinéraire technique (1 : très intensif, 2, 3, 4 : très extensif) ; CLUSDISEASE : groupe de maladies ; VARGROUP : groupe de variétés ; BRBIN : niveau binarisé de rouille brune ; YRBIN : niveau binarisé de rouille jaune ; FHBBIN : niveau binarisé de fusariose ; PMBIN : niveau binarisé d'oïdium ; STBBIN : niveau binarisé de septoriose (*Z. tritici*).

### 2.5 Degrés de liens entre variables : test de chi-deux

Le Tableau 1 fournit par ailleurs une vue d'ensemble des associations entre maladies (épidémie, non-épidémie), d'une part, et syndromes de maladies (X, Y ou Z), itinéraires techniques (CMGT1 à 4), et années (2003 à 2008), d'autre part. Les valeurs de chi-deux obtenues indiquent le rejet ( $P < 0.001$ ) de l'hypothèse d'indépendance entre chacune des cinq maladies, ou des trois syndromes (CLUSDISEASE), avec les années climatiques. De la même manière, l'utilisation de variables de maladies binaires permet de tester et de rejeter ( $P < 0.001$ ), l'indépendance d'épidémies dans les quatre itinéraires techniques, pour chacune des cinq maladies et également les trois syndromes.

Les valeurs numériques des chi-deux du Tableau 1 fournissent une vue d'ensemble quantitative des associations entre variables qualitatives cardinales (groupes de variétés, itinéraires techniques), variables qualitatives ordinales (années climatiques) et variables quantitatives représentées par des catégories binaires (intensités de maladies). En général, l'association entre années climatiques et intensités de maladies est très forte ( $\chi^2 = 87.01$  à  $1401.81$ ). Le lien entre groupes de variétés et intensités de maladies est moins fort et variable ( $\chi^2 = 6.41$  à  $321.14$ ), tandis que le lien entre itinéraires techniques et intensités de maladies est généralement stable et plus faible ( $\chi^2 = 21.22$  à  $82.06$ ). Ces associations constituent la base d'une analyse factorielle des correspondances multiples.

### 2.6 Analyse factorielle des correspondances multiples : variétés, itinéraires techniques, années et maladies du blé

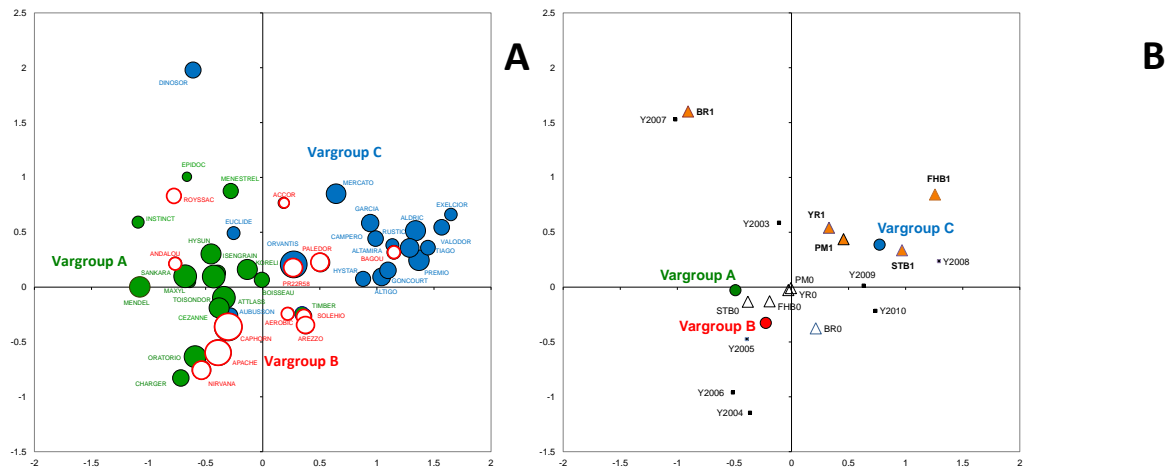
L'analyse factorielle des correspondances multiples des données résumées dans le Tableau 1 aboutit à l'identification d'une série d'axes liant les cinq variables de maladies (binarisées), les huit années et les trois groupes de variétés de blé. Les deux premiers axes rendent compte respectivement de 12,73 et 11,42% de l'inertie totale de ce système de variables en correspondances multiples (tableau de Burt). Ce système d'axes est ensuite utilisé pour, d'une part, projeter les différentes variétés de blés individuelles grâce à leurs coordonnées (Figure 3) et d'autre part, les itinéraires techniques (CMGT 1 à 4).

Les deux premiers axes rendent compte des inerties des variables (binaires) de maladies à différents degrés (cosinus carrés) : bien pour la rouille brune, BR (axe 1 : 19,3 et axe 2 : 60,2%) ; assez bien pour la fusariose, FHB (24,1 et 10,9%) ; assez bien pour la septoriose, STB (37,0 et 4,5%) ; mais médiocre pour la rouille jaune, YR (0,2 et 0,5%) et pour l'oïdium, PM (1,2 et 1,3%). Les deux axes rendent également compte des années climatiques d'une manière variable. Les années 2004 (1,0 et 14%), 2006 (0,4 et 14%), 2007 (23 et 57%) et 2008 (42 et 1,4%) sont les mieux représentées. Ces années correspondent à des niveaux d'épidémies élevées de certaines des maladies, comme l'indique la Figure 2. Ce système d'axes fournit ainsi une représentation acceptable des variables, avec un accent particulier sur la rouille brune, la fusariose et la septoriose, de même que certaines années couvertes par la présente analyse.

Les groupes de variétés sont associés (cosinus carrés) de manières variables aux axes de l'analyse. Les axes 1 et 2 rendent compte, respectivement, de 12,3 et 0,01% de VARGROUP-A, de 2,7 et 5,6% de VARGROUP-B et de 27,5 et 6,9% de VARGROUP-C. L'examen des contributions aux axes de l'analyse indique donc que le VARGROUP-C est fortement associé à des niveaux variables de maladies, alors que les deux autres groupes de variétés le sont moins. Au contraire, les itinéraires techniques (CMGT 1 à 4) sont associés faiblement aux deux axes identifiés, avec des cosinus carrés de 0,02 à 0,69% seulement pour l'axe 1 et 0,13 à 1,03% pour l'axe 2. Les itinéraires techniques n'apparaissent donc pas associés d'une manière forte à des variations d'intensité de maladies, représentées par la forme binaire : épidémie, non-épidémie.

La Figure 3 présente les positions des centres d'inertie (à droite) des niveaux de maladies binarisés, des années climatiques et des groupes de variétés. Les itinéraires techniques CMGT1 à 4, qui seraient

tous positionnés au centre du graphe, ne sont pas représentés. L'absence de maladie, représentée par BR0, YR0, FHB0, PM0 et STB0, est également positionnée au centre du graphe. Le groupe de variétés VARGROUP-C apparaît fortement associé à la présence de fusariose (FHB1) et de septoriose (STB1), de même que, mais à un moindre degré, à la rouille jaune (YR1) et à l'oïdium (PM1). Les groupes de variétés VARGROUP-A et B sont faiblement associés seulement à l'oïdium et à la rouille jaune. La présence de rouille brune (BR1) joue un rôle important dans les associations présentées dans la Figure 3. BR1 est fortement associé à l'année climatique 2007. La présence de rouille brune (BR1) est faiblement associée aux groupes de variétés A et C, mais est dissociée du groupe de variétés B. Les variétés individuelles sont également représentées dans la Figure 3 (à gauche).

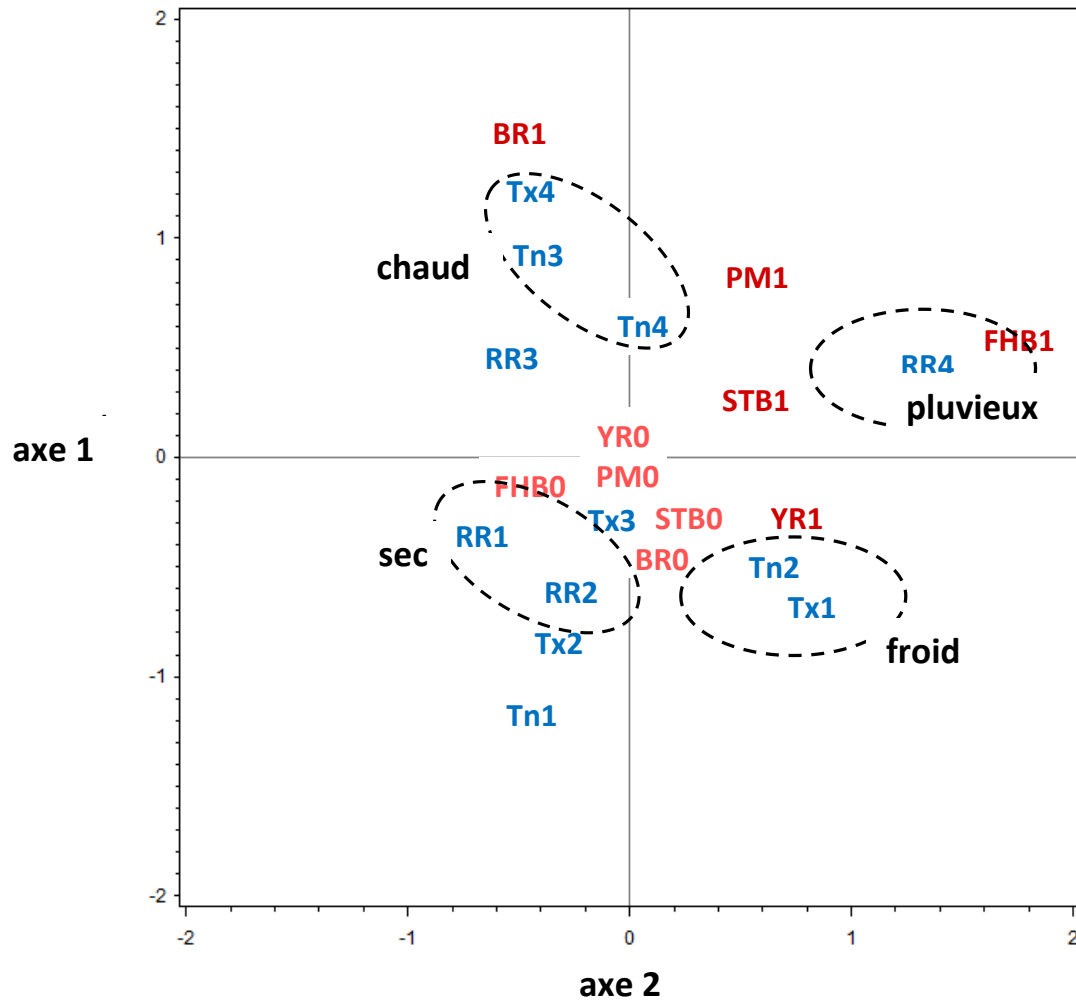


**Figure 3** : Projection des variétés caractérisées par leurs niveaux de maladie sur un système d'axes générés par analyse de correspondances multiples entre années et niveaux de maladies (binaires). L'analyse factorielle de correspondances multiples met en jeu les niveaux de maladies représentés par leurs formes binaires (épidémie / non-épidémie) et les années successives (2003-2010) comme variables actives. Seuls les deux premiers axes (qui représentent respectivement 12.73 et 11.42% de l'inertie totale) sont utilisés. Les variétés de blé constituent des variables indépendantes supplémentaires qui sont projetées, en fonction de leurs niveaux de maladies, sur le système d'axe obtenu. **A** : positionnement des variétés sur le graphe. Les couleurs correspondent aux trois groupes (VARGROUP A, B, C) de variétés identifiés par classification. La surface des cercles est proportionnelle au nombre de parcelles de chaque variété. **B** : positionnement des centres d'inertie des années, des niveaux de maladies (binaires : 1 : épidémie, 2 : non-épidémie) et des groupes de variétés (VARGROUP A, B, C). Noter que (i) les groupes de variétés ne proviennent pas de l'analyse de l'ensemble des données, mais d'une analyse spécifique sur l'ensemble des données non transformées (moyennes, écart-types) des parcelles correspondant à l'itinéraire technique CMGT 3 ; (ii) les itinéraires techniques, CMGT1 à CMGT 4, qui sont projetés à proximité de l'origine des axes (faible lien des itinéraires techniques vis-à-vis des niveaux de maladies binarisés), ne sont pas représentés sur le graphe.

## 2.7 Analyse factorielle des correspondances multiples : climat et maladies du blé

Cette analyse examine les relations entre maladies et conditions climatiques (de mars à juin de chaque année). Les tableaux de contingence entre niveaux binaires de maladies (épidémie, non-épidémie) et niveaux catégorisés (quartiles) des variables climatiques constituent la base d'une autre série d'analyses de chi-deux et d'une analyse factorielle des correspondances multiples, que nous résumons ici.

Le résultat graphique de cette analyse factorielle est présenté dans la Figure 4, où apparaissent différents types de conditions climatiques.

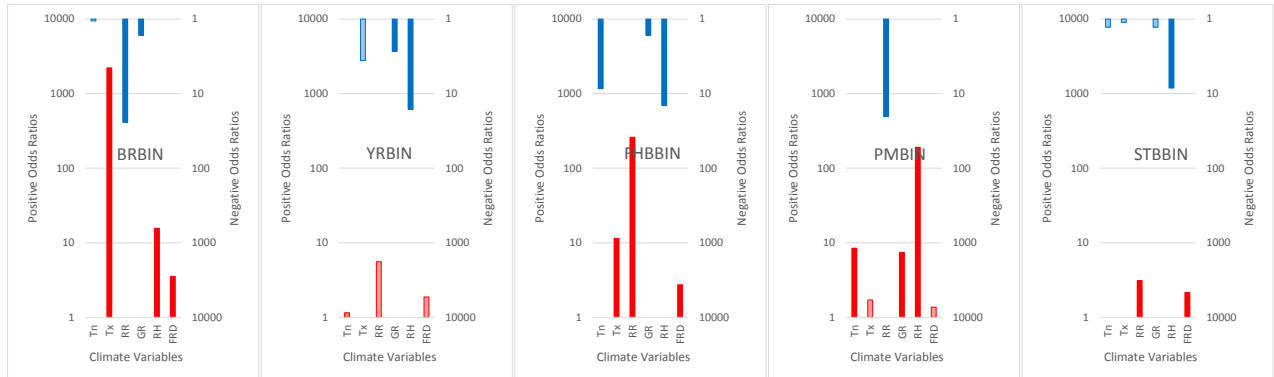


**Figure 4 :** Graphe de l'analyse factorielle des correspondances multiples entre niveaux binaires de maladies et quartiles des distributions de fréquence des variables climatiques. Niveaux de maladies sous forme binaires : non-épidémie (0) et épidémie (1) de rouille brune (BR), rouille jaune (YR), fusariose (FHB), oïdium (PM) et septoriose (STB). Les quartiles successifs de la moyenne de la température quotidienne maximale (Tx) et minimale (Tn), de la pluviométrie quotidienne (RR) indicés de 1 à 4. Les axes 1 et 2 représentent respectivement 16.15 et 13.35 % de l'inertie totale. Les ellipses en pointillés et les annotations ('sec', 'pluvieux', 'chaud', 'froid') sont des interprétations.

Les années avec de fortes pluies (RR4) sont opposées aux saisons avec de faibles pluies (RR1 et RR2) selon la première diagonale du graphe. Les années chaudes (Tx4, Tn3, Tn4) sont également opposées aux années froides (Tx1, Tn2) selon la seconde diagonale. Ainsi, quatre quadrants, « pluvieux », « froid », « sec » et « chaud », apparaissent dans le graphe. Les non-épidémies (BR0, YR0, FHB0, PM0, and STB0) sont regroupées au centre du graphique, indiquant leurs associations prédominantes avec des conditions climatiques neutres. Par opposition, la présence de rouille brune (BR1) est fortement associée aux températures élevées (Tx4, Tn3) ; la fusariose (FHB1) est associée à des conditions pluvieuses ; et la rouille jaune (YR1) apparaît associée à des conditions plus froides (Tx1, Tn2). La présence d'oïdium (PM1) apparaît associée à des conditions climatiques intermédiaires, pluvieuses, mais non excessivement (RR3 à RR4, par opposition à RR1 et RR2) et des conditions de températures modérément élevées (Tx4, Tn3, et Tn4, par opposition à Tn2 et Tx1). La présence de septoriose (STB1) est principalement associée à des conditions pluvieuses, quel que soient les températures.

## 2.8 Les conditions climatiques analysées comme facteurs de risques : régressions logistiques

Les analyses de régression logistique peuvent être représentées graphiquement. Le détail des calculs requis est présenté dans un article publié récemment (Savary *et al.*, 2016b) et seul le résumé graphique est présenté ici (Figure 5).



**Figure 5 :** Histogrammes des facteurs de risques climatiques pour les maladies du blé. Les risques de maladie sont représentés par leur forme binaire (épidémie, non-épidémie) pour la rouille brune (BRBIN), la rouille jaune (YRBIN), la fusariose (FHBBIN), l'oïdium (PMBIN), et la septoriose (STBBIN). Les paramètres associés aux prédicteurs climatiques issus de régressions logistiques sont représentés par des barres verticales sur une échelle logarithmique. Les paramètres climatiques avec un effet positif sur les risques de maladies sont tracés du bas vers le haut (axe de gauche) ; les paramètres avec un effet négatif sont tracés du haut vers le bas (axe de droite). Pour permettre la comparaison entre effets sur des maladies différentes, les risques relatifs (odds ratio) corrigés (corOR<sub>i</sub>) sont d'abord calculés en fonction de la distribution de fréquence du risque de maladie considéré (Harrell, 2001). Si corOR<sub>i</sub> < 1, les risques relatifs corrigés sont ensuite transformés en 1/corOR<sub>i</sub>, pour représenter les risques relatifs de non-épidémies. Les barres foncées correspondent à des prédicteurs dont l'effet est associé à une probabilité : P < 0.01, et les barres claires, à une probabilité : P > 0.01.

Chacune des maladies du blé peut être associée à des facteurs de risques climatiques, positifs (associés aux épidémies) ou négatifs (associés aux non-épidémies). Dans le cas de la rouille brune (Figure 5, BRBIN) la température maximale quotidienne (Tx) est un facteur de risque positif très important ; l'humidité (RH) et la pluviosité (FRD) sont également des facteurs de risques positifs significatifs, mais beaucoup moindres. La pluviométrie (RR), par opposition, est un facteur de risque négatif, comme le rayonnement global (GR), ce dernier à un bien moindre degré. Dans le cas de la rouille jaune (Figure 5, YR), aucun facteur de risque statistiquement significatif (P > 0.01) n'est identifié (la pluviométrie, RR semble cependant associée à des risques accrus). Une humidité élevée (RH) et un rayonnement important (RG) sont cependant des facteurs de risques négatifs (associés à l'absence de rouille jaune). Pour la fusariose (FHB, Figure 5) les facteurs de risques identifiés sont la pluviométrie et des températures maximales élevées, ainsi qu'une pluviosité importante ; les facteurs de risques négatifs sont des températures minimales élevées, un rayonnement important et une humidité relative élevée. Pour l'oïdium (PM, Figure 5) les facteurs de risques sont une humidité élevée, un rayonnement important et des températures journalières minimales élevées ; la pluviométrie (RR) est un facteur de risque négatif (risque d'épidémie réduit). La septoriose (STB, Figure 5) est associée à deux facteurs de risque modérés, mais significatifs, la pluviométrie (RR) et la pluviosité (FRD) ; l'humidité relative (RH) est un facteur de risque négatif.

### 3. Discussion

Les analyses présentées ici contribuent à comprendre l'information très riche générée par ce réseau d'expérimentations sur les variétés de blé rustique d'hiver. Une description plus détaillée des analyses et des résultats obtenus est présentée par Savary et al. (2016a ; 2016b).

#### 3.1 Distributions de fréquences et conversion des données de maladie en variables binaires

La Figure 2 illustre un constat fréquent issu d'expérimentations à grande échelle ou d'enquêtes réalisées dans des champs (Savary et al., 1994, 1995) : pour quatre des cinq maladies étudiées (BR, YR, FHB, PM), les distributions de fréquences d'intensité de maladie (sévérité ou incidence) sont très fortement asymétriques, avec une grande majorité des parcelles élémentaires ayant très peu ou pas de maladie, alors qu'une minorité de parcelles a des niveaux d'intensité de maladie variables. La distribution de fréquences associée à STB indique une structure plus complexe, avec trois groupes de parcelles individuelles : un large groupe avec pas ou peu de maladie, un troisième groupe, assez petit, avec un niveau de maladie élevée et un second groupe avec des niveaux de maladie intermédiaires. Ce type de distribution a été documenté dans différents pathosystèmes (Savary et al., 1994 ; Avelino et al., 2004 ; Zhang et al., 2006) et a été associé avec les étapes successives de dynamique de maladie, depuis son établissement jusqu'à son intensification (Savary et al., 1995). Une telle variabilité de distributions de fréquences représente un défi pour l'analyse des données, qui peut être traité par la catégorisation des données (Savary et al., 1995), ou, comme dans le cas présent, par la conversion des données sous forme binaire (Esker et al., 2006). La catégorisation des données issues de grands jeux de données sur plusieurs années et impliquant différents observateurs permet de standardiser l'information et de réduire l'effet des erreurs d'observation (Savary et al., 1995).

Une catégorisation des données a également été effectuées sur les années expérimentales, considérées comme des variables catégoriques dans les premières analyses effectuées (Figure 3 et Tableau 1), de telle sorte que les années climatiques deviennent des prédicteurs.

#### 3.2 Relation entre intensité de maladie, syndromes de maladies, variétés, itinéraires techniques et années climatiques

Le tableau 1 documente l'intensité des associations entre les facteurs (années climatiques, itinéraires techniques, groupes de variétés) et les niveaux de maladie binarisés. L'association des maladies avec les années climatiques est en général très forte (valeurs de chi-deux entre 87 et 1402), indiquant un effet très fort des années climatiques sur l'occurrence d'épidémies. L'intensité d'associations des maladies avec les groupes de variétés vient ensuite, avec des valeurs variables des chi-deux comprises entre 6,41 et 321. L'association des niveaux de maladies avec les itinéraires techniques vient en dernier, avec des valeurs de chi-deux comparativement plus faibles mais significatives (21 à 82). Les tests considérant les syndromes de maladie (CLUSDISEASE) fournissent un résumé de la magnitude des associations de niveaux de maladie avec les facteurs ; les valeurs de chi-deux sont très grandes pour les années climatiques (1005), grandes pour les groupes de variétés (134) et plus faibles pour les itinéraires techniques (32).

Les années climatiques favorables, de même que l'utilisation de variétés sensibles affectent à la fois l'établissement d'une maladie et son intensification, alors que les itinéraires techniques affectent principalement l'intensification d'une maladie. Ceci explique en partie pourquoi les valeurs de chi-deux associées aux itinéraires techniques sont plus faibles que celles associées aux années climatiques et aux groupes de variétés. Un autre élément d'explication réside dans le fait que l'intensification chimique depuis CMGT4 jusqu'à CMGT1 correspond (1) à une intensification de l'emploi des pesticides, qui a pour effet attendu de réduire l'intensité de maladie et (2) à une intensification d'apport d'engrais azoté, qui en général favorise les agents pathogènes biotrophes tels que les rouilles et l'oïdium (par exemple,

de Wit 1992), ainsi que la septoriose (par exemple, Leitch et Jenkins 1995). La transition entre niveaux de gestion, de CMGT1 à CMGT4, a ainsi des effets opposés sur les maladies, qui s'annulent partiellement.

L'analyse factorielle de correspondances multiples (Figure 3) génère une synthèse des associations entre variables en utilisant une métrique de chi-deux (Tableau 1), avec trois domaines. Un premier domaine est celui d'une occurrence régulière de FHB, STB, PM et YR et d'épidémies relativement fréquentes de BR, où les variétés du VARGROUP-C prédominent. Un second domaine correspond à des épidémies possibles de PM, YR et BR, associées à VARGROUP-A. Un troisième domaine est associé à des épidémies peu fréquentes de manière générale et avec les variétés du groupe VARGROUP-B. Le positionnement de PM et YR est difficile, étant donné la fréquence faible d'épidémies de ces deux maladies. Les deux axes de la figure 3 ne représentent qu'une très faible fraction des inerties des itinéraires techniques (CMGT1 à CMGT4). Ces derniers sont positionnés près de l'origine des axes et n'ont donc pas pu être représentés sur la figure 3. Cette figure, en accord avec les résultats des tests de chi-deux (Tableau 1), suggère que les années climatiques, puis les variétés et enfin les itinéraires techniques, ont contribué à l'occurrence d'épidémies de maladies du blé, individuellement ou collectivement.

### 3.3 Effet du climat sur les intensités de maladie

L'analyse des correspondances (Figure 4) génère une représentation synthétique des relations entre maladies du blé et climat : la rouille brune est associée à des saisons chaudes et relativement pluvieuses ; la rouille jaune correspond à des saisons fraîches avec des précipitations variables ; la fusariose des épis est associée à des saisons pluvieuses et des températures variables ; l'oïdium correspond à des saisons relativement chaudes et des conditions pluvieuses ; et la septoriose est associée à des conditions plutôt pluvieuses. Ce panorama est en accord avec le nombre important de publications sur le sujet, discutées dans Savary et al. (2016b).

Les régressions logistiques (Figure 5) documentent plus avant les associations entre le climat et les maladies. Par exemple, les risques de fusariose des épis sont associés positivement avec les températures maximales, négativement avec les températures minimales et positivement avec les variables de précipitations et d'humidité, ce qui peut refléter les caractéristiques journalières favorables aux épidémies.

## Conclusions

Une meilleure quantification des niveaux de maladie est une première étape nécessaire pour améliorer leur gestion, spécialement dans le cas du blé d'hiver en France et en Europe (Willoquet et al., 2008), où les intrants pesticides doivent être réduits et où le potentiel de la diversité génétique végétale doit être mieux exploité. Cet article s'est focalisé sur des niveaux de maladie, leurs combinaisons et leurs déterminants, dans un réseau d'expérimentations de blé au champ impliquant une gamme d'années climatiques, d'itinéraires techniques et de variétés en France.

Aborder simultanément l'ensemble des maladies des plantes dans une approche de facteurs de risque apparaît très prometteur pour quantifier et hiérarchiser les risques et les priorités pour la gestion de la santé des plantes.

Les différentes analyses indiquent que les années climatiques, les variétés de blé et les itinéraires techniques, dans cet ordre décroissant, définissent le risque de maladie dans le pathosystème multiple des maladies du blé observé dans ce réseau d'expériences. Des relations robustes entre risque d'épidémies et variables climatiques ont pu être déterminées.



## Remerciements

Cette recherche a été financée en partie par le projet « PEBiP – Analyse stratégique des relations Pratiques - Environnement - Bioagresseurs - Pertes de récoltes », qui a bénéficié du soutien de l'ONEMA dans le cadre du programme « Pour et Sur le Plan Ecophyto ». Nous remercions également le réseau Blé Rustiques (INRA, ARVALIS, Chambres d'Agriculture et le CIVAM) pour avoir rendu les données accessibles.

## Références bibliographiques

- Avelino J., Willocquet L., Savary S., 2004. Effects of crop management patterns on coffee rust epidemics. *Plant Pathology* 53: 541–547.
- Avelino J., Zelaya H., Merlo A., Pineda A., Ordonez M., Savary S., 2006. The intensity of a coffee rust epidemic is dependent on production situations. *Ecological Modelling* 197: 431–447.
- Benzécri J.P., 1973. L'Analyse des Données, Tome 2 (632 p). Paris: L'Analyse des Correspondances. Dunod.
- Bouchard C., Bernicot M.H., Félix I., Guérin O., Loyce C., Omon B., et al., 2008. Associer des itinéraires techniques de niveaux d'intrants variés à des variétés rustiques de blé tendre: évaluation économique, environnementale et énergétique. *Courrier de l'Environnement* 55: 53–77.
- Brancourt-Hulmel M., Doussinault G., Lecomte S., Bérard P., Le Buanec B., Trottet M., 2003. Genetic improvement of agronomic traits of winter wheat cultivars released in France from 1946 to 1992. *Crop Science* 43: 37–45.
- De Wit C.T., 1992. Resource use efficiency in agriculture. *Agricultural Systems* 40: 125–151.
- De Wolf E.D., Madden L.V., Lipps P.E., 2003. Risk assessment models for wheat Fusarium head blight epidemics based on within season weather data. *Phytopathology* 93: 428–435.
- Doussinault G., 1998. La sélection pour des variétés adaptées à une agriculture durable. *Dossiers Environnement* 16: 39–44.
- Durand Y., Giraud G., Laternser M., Etchevers P., Mérindol L., Lesaffre B., 2009. Reanalysis of 47 years of climate in the French alps (1958–2005): Climatology and trends for snow cover. *Journal of Applied Meteorology and Climatology* 48: 2487–2512.
- Esker P.E., Harri J., Dixon P., Nutter Jr. F.W., 2006. Comparison of models for forecasting of Stewart's disease of corn in Iowa. *Plant Disease* 90: 1353–1357.
- Félix I., Loyce C., Bouchard C., Meynard J.M., Bernicot M.H., Rolland B., et al. 2002. Associer des variétés rustiques à des niveaux d'intrants réduits: intérêts économiques et perspectives agronomiques. *Perspectives Agricoles* 279: 30–35.
- Greenacre M.J., 1984. *Theory and Applications of Correspondence Analysis*. London: Academic Press.
- Harrell Jr. F.E., 2001. *Regression Modeling Strategies: With Applications to Linear Models, Logistic Regression, and Survival Analysis*. New York: Springer Verlag.
- Jennings P., Coates M.E., Walsh K., Turner J.A., Nicholson P., 2004. Determination of deoxynivalenol- and nivalenol-producing chemotypes of *Fusarium graminearum* isolated from wheat crops in England and Wales. *Plant Pathology* 53: 643–652.
- Lames F.C., McCulloch C.E., 1990. Multivariate analysis in ecology and systematics: panacea or Pandora's box? *Annual Review of Ecology and Systematics* 21: 129–166.
- Leitch M.H., Jenkins P.D., 1995. Influence of nitrogen on the development of Septoria epidemics in winter. *Journal of Agricultural Science* 124: 361–368.
- Lenné J.M., Jeger M.J., 1994. Evaluation of plant pathogens in complex ecosystems. In J.P. Blakeman, B. Williamson Eds.), *Ecology of plant pathogens* (pp. 63–77). Wallingford: CABI.

- Loyce C., Meynard J.M., Bouchard C., Rolland B., Lonnet P., Bataillon P., et al., 2008. Interaction between cultivar and crop management effects on winter wheat diseases, lodging, and yield. *Crop Protection* 27: 1131–1142.
- Loyce C., Meynard J.M., Bouchard C., Rolland B., Lonnet P., Bataillon P., et al., 2012. Growing winter wheat cultivars under different management intensities in France: a multicriteria assessment based on economic, energetic and environmental indicators. *Field Crops Research* 125: 167–178.
- Nielsen L.K., Jensen J.D., Nielsen G.C., Jensen J.E., Spliid N.H., Thomsen, I.K., et al., 2011. Fusarium head blight of cereals in Denmark: Species complex and related mycotoxins. *Phytopathology* 101: 960–969.
- Reddy C.S., Laha G.S., Prasad M.S., Krishnaveni D., Castilla N.P., Nelson A., et al., 2011. Characterizing multiple linkages between individual diseases, crop health syndromes, germplasm deployment, and rice production situations in India. *Field Crops Research* 120: 241–253.
- Quintana-Seguí P., Le Moigne P., Durand Y., Martin E., Habets F., Baillon M., et al., 2008. Analysis of Near-Surface Atmospheric Variables: Validation of the SAFRAN Analysis over France. *Journal of Applied Meteorology and Climatology* 47: 92–107.
- Savary S., Jouanin C., Félix I., Gourdain E., Piraux F., Willocquet L., Brun F., 2016a. Assessing plant health in a network of experiments on hardy winter wheat varieties in France: multivariate and risk factor analyses. *European journal of Plant Pathology* 146: 757–778. DOI 10.1007/s10658-016-0955-1
- Savary S., Jouanin C., Félix I., Gourdain E., Piraux F., Brun F., Willocquet L. 2016b. Assessing plant health in a network of experiments on hardy winter wheat varieties in France: patterns of disease-climate associations. *European journal of Plant Pathology* 146: 741–755. 10.1007/s10658-016-0954-2
- Savary S., Elazegui F.A., Moody K., Teng P.S., 1994. Characterization of rice cropping practices and multiple pest systems in the Philippines. *Agricultural Systems* 46: 385–408.
- Savary S., Madden L.V., Zadoks J.C., Klein-Gebbinck H.W. 1995. Use of categorical information and correspondence analysis in plant disease epidemiology. In *Advances in Botanical Research incorporating Advances in Plant Pathology* 21, 213–240. London: Academic Press Ltd.
- Savary S., Teng P.S., Willocquet L., Nutter Jr. F.W., 2006. Quantification and modeling of crop losses, a review of purposes. *Annual Review of Phytopathology* 44: 89–112.
- Savary S., Mila A., Willocquet L., Esker P.D., Carisse O., McRoberts N., 2011. Risk factors for crop health under global change and agricultural shifts: a framework of analyses using rice in tropical and subtropical Asia as a model. *Phytopathology* 101: 696–709.
- Steinberg D., Colla P., 2007. Logistic regression, Pages 2–92 in. *Statistics III, SYSTAT 12*. San Jose, CA: SYSTAT Software, Inc.
- Wilkinson L., Engelman E., Corter J., Coward M., 2007. Cluster analysis pp. 65–124: *SYSTAT Statistics 12, Vol 1*. San Jose, CA.
- Willocquet L., Aubertot J.N., Lebard S., Robert C., Lannou C., Savary S., 2008. WHEATPEST, a production situation - based simulation model of yield losses caused by multiple injuries for wheat in Europe. *Field Crops Research*, 107, 12–28.
- Zadoks J.C., Chang T.T., Konzak C.F., 1974. A decimal code for the growth stages of cereals. *Weed Research* 14: 415–421.
- Zhang X.Y., Loyce C., Meynard J.M., Savary S., 2006. Characterization of multiple disease systems and cultivar susceptibilities for the analysis of yield losses in winter wheat. *Crop Protection* 25: 1013–1023.

Cet article est publié sous la licence Creative Commons (CC BY-NC-ND 3.0)



<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/3.0/fr/>

Pour la citation et la reproduction de cet article, mentionner obligatoirement le titre de l'article, le nom de tous les auteurs, la mention de sa publication dans la revue « Innovations Agronomiques », la date de sa publication, et son URL)