



Projet PEBiP. Analyse stratégique des relations Pratiques - Environnement - Bioagresseurs - Pertes de récoltes

Projet porté par François Brun, ACTA – Les Instituts Techniques Agricoles.

Partenaires : INRA AGIR (Serge Savary, Laetitia Willocquet, Céline Jouanin), ARVALIS – Institut du végétal (Nathalie Verjux, Irène Felix, Emmanuelle Gourdain, François Piraux)

Projet financé dans le cadre de l'APR "Pour et Sur le Plan ECOPHYTO (PSPE)", action pilotée par le ministère en charge de l'agriculture, avec l'appui financier de l'Office national de l'eau et des milieux aquatiques, par les crédits issus de la redevance pour pollutions diffuses attribués au financement du plan Ecophyto.

Dates du projet : 8 juillet 2013 au 7 juillet 2016

1. Fiche de synthèse à diffusion publique

Voir annexe 1.

2. Rapport d'activité

Administratif

Voici les principales dates clefs dans la gestion globale du projet.

- Juillet 2013 : début projet PEBiP.
- Automne 2013 : conventions partenaires signées.
- Juin 2014 : séminaire inter-projets PSPE
- Novembre 2014 : rapport intermédiaire
- Septembre 2015 : rapport intermédiaire
- Septembre 2015 : séminaire inter-projets PSPE
- Juillet 2016 : fin du projet.
- Septembre-Octobre 2016 : récupération des justificatifs finaux des partenaires.

Nous n'avons pas rencontré de difficulté particulière lors du conventionnement ou le suivi administratif.

Synthèse du déroulement du projet

La première année du projet nous a permis de bien commencer les travaux, avec notamment l'appui de Céline Jouanin en CDD sur ce projet pour 11 mois dès novembre 2013. Après un examen des différentes sources de données envisagées lors du début du projet et des échanges avec les personnes représentant ces dispositifs expérimentaux et de réseaux d'observation, nous avons fait le diagnostic que l'exploitation de certaines sources de données ne serait pas possible (du fait de l'absence de données essentielles), nous obligerait à faire des hypothèses importantes, ou bien encore, nécessiterait plus de ressources pour les exploiter. Aussi, nous avons décidé de nous concentrer sur les sources de données présentant une richesse suffisante pour réaliser l'analyse. Ainsi, les travaux d'analyse et de modélisation statistique se sont concentrés sur les données issues du réseau expérimental « blés rustiques » (ou « Picoblé ») mené par Arvalis, l'INRA et différentes chambres d'agriculture entre 2003 et 2010 sur une grande partie de l'ouest, du nord et du centre de la France. Ces essais visent à évaluer le comportement de variétés du point de vue de leurs performances dans des itinéraires techniques contrastés correspondant à des niveaux d'intrants (densité de semis, fumure minérale et produits phytosanitaires) variés.

La seconde année du projet nous a permis de finaliser les travaux d'analyse de données engagés et d'aller sur la valorisation sous la forme de publication avec les échanges avec les fournisseurs des données.

Nous avons aussi commencé à explorer les données issues du dispositif d'évaluation des variétés (post-inscription) par Arvalis présentant une bonne couverture nationale, de nombreuses variétés, des notations des maladies selon un protocole précis, la possibilité d'accéder à une estimation des pertes de rendement, mais relativement peu de diversité au niveau des pratiques agronomiques.

La troisième année du projet nous a permis, avec les ressources restantes, de finaliser les valorisations scientifiques en publiant deux articles sur l'analyse des données blés rustiques.

Bilan des actions prévues par tâche

Le projet initial était construit autour de 4 grandes tâches. Pour chacune voici l'état de réalisation en fin de projet. Les partenaires ont contribué aux différentes tâches comme prévu initialement, autour du recrutement essentiel d'une statisticienne en CDD de 11 mois.

Tâche 1. Conception et construction de la base de données PEBIP

Un certain nombre de sources de données avaient été identifiées lors du dépôt du projet. Nous avons réalisé une pré-étude de ces données pour voir dans quelle mesure elles pouvaient alimenter le cadre de réflexion proposé. Pour chacune, nous proposons un point d'analyse. Mais au final, nous n'avons pu mettre notre démarche en œuvre complètement uniquement sur la base de données Blés Rustiques.

• **Réseau blés rustiques**

Un travail conséquent a été réalisé sur les données issues du réseau expérimental « blés rustiques » mené par Arvalis, l'INRA et différentes chambres d'agriculture entre 2003 et 2010 sur une grande partie de l'ouest et du centre de la France. Ces essais visent à évaluer le comportement de variétés présentant différents profils de résistances aux maladies du point de vue de leurs performances et des maladies foliaires les affectant dans des itinéraires techniques contrastés correspondant à des niveaux d'intrants (azote et produits phytosanitaires) variés (ITK1 très intensif avec un fort niveau d'intrant à ITK4 avec un niveau réduit d'intrant) et une large gamme de variétés. Les premières analyses montrent que ces données sont pertinentes pour notre analyse, avec des premiers résultats intéressants.

Les activités suivantes ont été réalisées en totalité sur les données blés rustiques

- Activité 1.1. Identification des zones d'étude et du grain temporel considéré
- Activité 1.2. Spécification du jeu de données requis
- Activité 1.3. Agrégation des données, encodage et vérification pour une zone d'étude pilote
- Activité 1.4. Construction des bases de données sur l'ensemble des zones identifiées

• **Essais variétés blés tendres, modalités traitées et non traitées fongicides**

Nous avons aussi commencé à analyser des données issues du dispositif d'évaluation des variétés (post-inscription) par Arvalis présentant une bonne couverture nationale, de nombreuses variétés, des notations des maladies selon un protocole précis, la possibilité d'accéder à une estimation des pertes de rendement, mais avec relativement peu de diversité au niveau des pratiques agronomiques. Nous avons commencé leur analyse, mais ensuite, afin de privilégier la finalisation des travaux déjà engagés sur la BD blé rustique, nous avons laissé de côté cette source d'information qui pourrait faire l'objet de travaux dans le cadre d'autres projets.

• **DEPHY – ferme**

Après analyse d'un échantillon des feuilles de suivi (fichier Excel) de ces réseaux, on s'aperçoit qu'une qualification de l'état sanitaire est faite, mais il ne s'agit que d'une appréciation qualitative à l'échelle du système de culture ("Pression au niveau du système de culture" avec un champ descriptif : "Expression de l'agriculteur" et une note qualitative "nulle/faible/moyenne/forte"). Si la note qualitative était bien renseignée, selon un protocole harmonisé au niveau national, cela pourrait constituer une source d'information intéressante pour les approches que nous proposons, mais visiblement cela n'est pas le cas. On peut attendre à des progrès dans les années à venir sur les protocoles (projet CASIMIR) et sur l'agrégation au niveau national (base de données agrosyst).

• **DEPHY – expérimentation**

Nous avons identifié plusieurs dispositifs sur lesquels notre démarche aurait pu se déployer car certains de ces réseaux d'essais systèmes et les données collectées s'apparentaient fortement au réseau Blés

rustiques. Néanmoins, en début de projet, ce réseau était trop récent (mise en place en 2011) avec une représentativité temporelle trop limitée. Nous avons présenté notre démarche à ces groupes, via l'animateur national (Emeric Emonet), mais en fin de projet nous n'avions plus les moyens d'aller plus loin. A noter que nous avons participé à la réunion organisée par le groupe Dephy-Expé sur les méthodes statistiques pour l'analyse et la valorisation des données (juin 2016).

- **réseaux épidémiosurveillance (Epiphyt)**

Ce réseau a une couverture nationale pour le blé, avec désormais une bonne homogénéité au niveau des protocoles de suivi des bio-agresseurs. Sa faiblesse est le faible nombre d'informations sur les pratiques des parcelles suivies. Ces parcelles étant géo-référencées, nous avons envisagé de croiser ces informations avec les informations du RPG, permettant notamment de reconstruire la taille de la parcelle, la rotation et de qualifier le contexte agricole local. Hors, le géo-référencement est souvent imprécis (de manière variable) pour notamment des questions d'anonymat. Cela nous empêchera de réaliser ces croisements à cette échelle fine. Une piste est d'utiliser ces données à l'échelle régionale pour quantifier le niveau de maladie, puis de mobiliser les données d'enquêtes pratiques et les données météo à cette échelle. Par ailleurs, le projet SynOEM (même AAP) se focalisant sur ces données, nous n'avons pas souhaité poursuivre sur cette source de données.

- **RPG - Registre Parcellaire Graphique**

Nous connaissons le potentiel de cette source de données et nous avons des compétences (travaux dans d'autres projets) au sein du partenaire INRA UMR AGIR, mais suite à la décision de ne pas mobiliser les données d'épidémiosurveillance nous n'avons pas eu à utiliser cette base de données.

- **Enquêtes pratiques culturelles - Céréales à paille**

Nous connaissons le potentiel de cette source de données et nous avons des compétences (travaux dans d'autres projets) au sein du partenaire INRA UMR AGIR, mais suite à la décision de ne pas mobiliser les données d'épidémiosurveillance nous n'avons pas eu à utiliser cette base de données.

- **Données météo**

Nous avons eu accès aux données météo Safran, qui sont des données quotidiennes couvrant la France à une résolution de 8 km (projection Lambert-II étendue). Elles sont produites par Météo-France (Centre National de Recherches Météorologiques, CNRM).

Tâche 2. Analyse des relations P-E-BI-P

Il s'agit d'analyser les relations entre les niveaux de maladies et l'environnement (comme la météo), les relations entre les niveaux de maladies et les pratiques agricoles (les ITK et les variétés). Ces travaux ont été réalisés sur la base de données blés rustiques.

Activité 2.1. Encodage et catégorisation des données.

Ce travail est achevé concernant la base de données blés rustiques. A noter que nous avons fait le choix de transformer en valeurs binaires les données relatives aux maladies (présence ou d'absence d'épidémie) : cela nous permet d'éliminer certains biais liés aux variations de protocoles et de réaliser certaines analyses. Ce choix, s'il conduit à une perte d'information, s'est révélé particulièrement pertinent pour surmonter les problèmes d'hétérogénéité des données, liée notamment à l'absence de protocoles uniformes. On pense que ce type de transformations et les résultats sont particulièrement intéressants pour les personnes cherchant à travailler sur des données d'origines diverses (protocoles différents et pas forcément détaillés). Pour les autres données, nous travaillons sur les données brutes.

Activité 2.2. Classifications et groupements

Nous avons obtenu des groupes de variétés avec une CAH utilisant une métrique de chi-deux et la méthode de Ward.

Activité 2.3. Analyses multivariées non paramétriques

Ce travail est achevé concernant la base de données blés rustiques. Plusieurs types d'analyses multivariées sont utilisées dont l'ACP, l'AFCM ainsi que des tests non paramétriques (test de Wilcoxon).

Activité 2.4. Analyses spécifiques (régressions logistiques, p.ex.) et analyses post-hoc

Ce travail est achevé concernant la base de données blés rustiques. Certaines associations de variables (santé végétale et situations de production, année climatique et variétés) suscitent des questions et des hypothèses à tester. On a réalisé alors des simples tests de Chi-deux (avec la correction de Yates ou test exact

de Fisher suivant les effectifs), des régressions logistiques. D'autres analyses sont utilisées comme les méta-analyses avec modèle mixtes.

Tâche 3: Evaluation conjointe des résultats d'analyses entre partenaires

Activité 3.1. Evaluation conjointe entre partenaires des relations PEBIP

Une réunion de travail a eu lieu avec les fournisseurs des données blés rustiques (Irène Félix, Arvalis) ainsi que ses collègues (François Piraux et Emmanuelle Gourdain) pour montrer la démarche et discuter des résultats obtenus. Les discussions se sont poursuivies lors de la rédaction des articles scientifiques.

Activité 3.2. Evaluation de la force des relations syndromes de santé végétale / situations de production

Identification éventuelle de syndromes ou de bioagresseurs émergents.

Le fait que différentes méthodes d'analyse permette d'obtenir des conclusions semblables nous a confortés dans la solidité des résultats.

Activité 3.3. Analyse des options de gestion de la santé végétale existantes, ou à développer, par situation de production

Cette analyse nécessiterait d'autres discussions avec les acteurs de terrain qui n'ont pas eu lieu dans le temps du projet.

Tâche 4: Dissémination des résultats, formation et valorisation

Activité 4.1. Evaluation des approches statistiques utilisées, et approches alternatives

Différentes méthodes d'analyse nous ont permis d'obtenir des conclusions semblables. L'approche par méta-analyse a aussi donné de bons résultats, néanmoins, nous n'avons pas encore pu finaliser l'article pour sa publication.

Activité 4.2. Formalisation de la démarche et illustration pour son transfert pour d'autres d'études

L'analyse des données Blés Rustiques est valorisée de manière scientifique sous la forme de 3 articles, mettant en avant la démarche et les méthodes mobilisées. Deux articles sont publiés. Le troisième (méta-analyse) demande encore des analyses complémentaires pour le finaliser.

On a participé aux discussions méthodologiques sur l'analyse statistique des essais systèmes organisé par l'animation nationale de Dephy-Expé.

Les résultats ont également fait l'objet de présentations lors de séminaires scientifiques.

Valorisations

- Article 1. Assessing plant health in a network of experiments on hardy winter wheat varieties in France: multivariate and risk factor analyses. Auteurs : Serge Savary, Céline Jouanin, Irène Félix, Emmanuelle Gourdain, François Piraux, Laetitia Willocquet and François Brun. European Journal of Plant Pathology (2 mai 2016). DOI 10.1007/s10658-016-0955-1
- Article 2. Assessing plant health in a network of experiments on hardy winter wheat varieties in France: patterns of disease-climate associations. Auteurs : Serge Savary, Céline Jouanin, Irène Félix, Emmanuelle Gourdain, François Piraux, Laetitia Willocquet and François Brun. European Journal of Plant Pathology (2 mai 2016). DOI 10.1007/s10658-016-0954-2
- Article 3. Assessing plant health in a network of experiments on hardy winter wheat varieties in France: Meta- analyses of variety and crop management effects on disease risks and yields. En cours de preparation.
- Outils sous le logiciel R pour valoriser les données météorologiques spatialisées à l'échelle France et Europe (transmis à d'autres groupes de recherche)
- Présentations des résultats lors d'un séminaire rassemblant l'ensemble des partenaires du réseau blés rustiques (septembre 2015).
- Présentations du projet et demande d'interactions lors du séminaire d'animation du réseau Dephy-EXPE (mai 2015).
- Echanges avec d'autres projets pour valoriser une partie de cette démarche sur d'autres problèmes sanitaires (projet casdar ECOHERBI en 2014-2015, projet casdar RESOLIM en 2015).

3. Rapport scientifique

Introduction

En France, de nombreuses informations sont collectées sur les contextes, les pratiques, les contraintes abiotiques et biotiques, et l'environnement des productions végétales, qui sont en première intention destinées à guider au fur et à mesure des saisons les pratiques agricoles et améliorer les performances de l'agriculture française. Il s'agit, en particulier, de gérer les risques associés aux bioagresseurs des cultures. Ces sources de données concernent l'ensemble de la diversité agroécologique française et reflètent nécessairement une grande diversité des informations concernant tout ou partie des relations P-E-Bi-P (pratiques - environnement - bioagresseurs - pertes de récoltes).

L'objectif de ce projet est d'élaborer une démarche générique d'analyse des relations P-E-Bi-P basée essentiellement sur des données déjà collectées et organisées. Nous avons notamment en ligne de mire les données issus des dispositifs DEPHY (ferme et expérimentation) et du dispositif de Surveillance Biologique du Territoire, mais aussi d'autres sources de données pouvant être croisées avec ces dernières pour apporter des éléments sur les pratiques et l'environnement. Cette démarche se fondera sur le blé en France comme exemple-clé.

Cette analyse des relations P-E-Bi-P doit apporter un ensemble d'informations précieuses qui, d'une manière générale, permettrait d'identifier (1) les syndromes de santé végétale (SV; dégâts occasionnés par des pathogènes et des ravageurs animaux), (2) les "situations de production" (SP) c'est-à-dire les itinéraires techniques dans des conditions climatiques et des contextes socioéconomiques données, et (3) le niveau d'association des associations SV-SP.

Nous résumons ici les principaux points méthodologiques et résultats qui sont décrits et justifiés en détails dans les deux articles (en annexe) :

- Article 1. Assessing plant health in a network of experiments on hardy winter wheat varieties in France: multivariate and risk factor analyses. Auteurs : Serge Savary, Céline Jouanin, Irène Félix, Emmanuelle Gourdain, François Piraux, Laetitia Willocquet and François Brun. *European Journal of Plant Pathology* (2 mai 2016). DOI 10.1007/s10658-016-0955-1
- Article 2. Assessing plant health in a network of experiments on hardy winter wheat varieties in France: patterns of disease-climate associations. Auteurs : Serge Savary, Céline Jouanin, Irène Félix, Emmanuelle Gourdain, François Piraux, Laetitia Willocquet and François Brun. *European Journal of Plant Pathology* (2 mai 2016). DOI 10.1007/s10658-016-0954-2

Les approches scientifiques et techniques utilisées

Principe de l'analyse stratégique des relations : pratiques - environnement - dégâts de bioagresseurs - pertes de récoltes.

La démarche d'analyse proposée vise à mettre en relation les différents éléments du système agricole autour des bioagresseurs. Pour cela, nous proposons, non pas de réaliser une étude indépendante pour chaque bioagresseur (Figure 1) qui présente un intérêt limité pour un raisonnement stratégique, mais bien de mener une analyse englobant l'ensemble des bioagresseurs d'une culture (Figure 2). Idéalement, nous proposons de mobiliser autant que possible la diversité des sources données préexistantes, collectées pour répondre à d'autres objectifs.

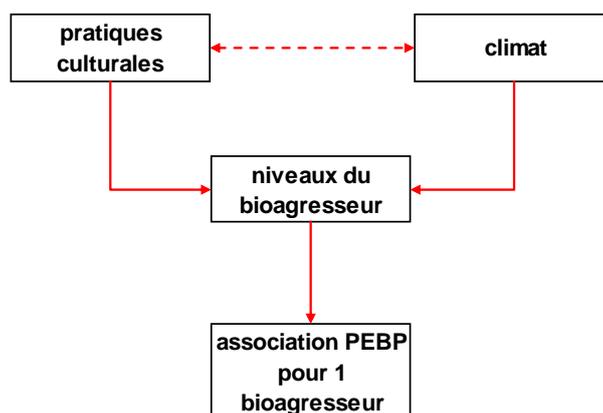


Figure 1. Principe de l'analyse PEBiP pour un bioagresseur.

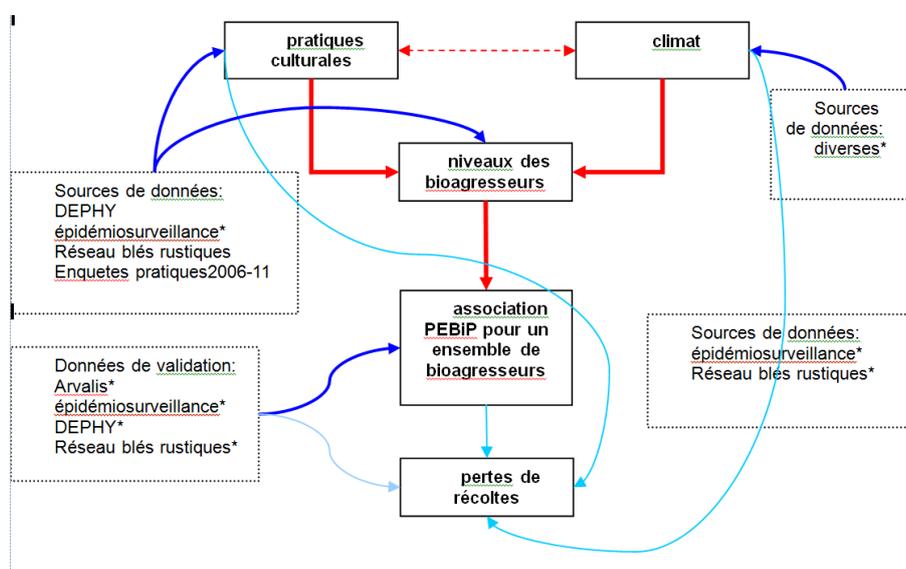


Figure 2. Stratégie de mobilisation des données pour l'analyse PEBiP pour un ensemble de bioagresseurs du blé. (*) dépendra de l'échelle collectivement choisie (p. ex.: Département, Région)

Il s'agit ensuite de constituer nos "individus" au sens statistique (en fonction du grain d'analyse choisi) et d'utiliser deux grandes familles de méthodes : les méthodes de classification, permettant de créer des groupes ayant des caractéristiques similaires, et des méthodes d'analyse de correspondance, permettant d'élaborer les corrélations entre situation de production et syndrome de santé végétal.

Base de données Blé rustique

Nous avons choisi de mettre en œuvre notre approche sur les données issues du réseau expérimental « blés rustiques » mené par Arvalis, l'INRA et différentes chambres d'agriculture entre 2003 et 2010 sur une grande partie de l'ouest et du centre de la France (Figure 3). Ces essais visent à évaluer le comportement de variétés présentant différents profils de résistances aux maladies du point de vue de leurs performances et des maladies foliaires les affectant dans des itinéraires techniques contrastés correspondant à des niveaux d'intrants (azote et produits phytosanitaires) variés (CMGT1 très intensif avec un fort niveau d'intrant à CMGT4 avec un niveau réduit d'intrant) et une large gamme de variétés. Le raisonnement des niveaux d'intensification est basé sur CMGT2, qui représente les recommandations actuelles pour les performances à haut rendement adaptées à chaque situation pedo-climatique.

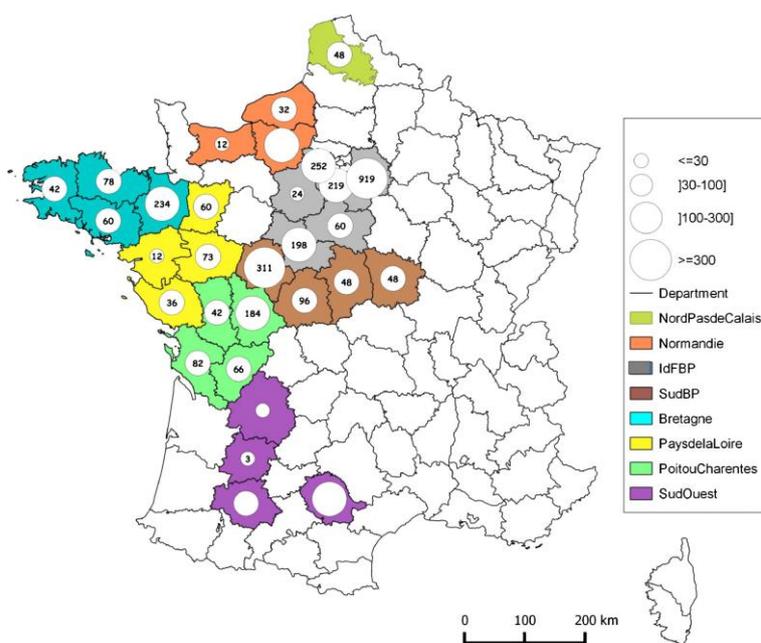


Figure 3. Vue d'ensemble du réseau d'expérimentation "blé rustique" de 2003 à 2010. La carte montre la répartition des 3525 parcelles (individus statistiques) correspondant à 101 expérimentations menées à travers les différents départements français. Les couleurs représentent les grandes régions françaises concernées

Les principales maladies foliaires ont été suivies sur les essais : la rouille brune (BR), la rouille jaune (YR), la fusariose (FHB), l'oïdium (PM) et la septoriose (STB). Les mesures quantitatives de maladie ont été faites avec une gamme de méthodes : sévérité (proportion de la surface foliaire présentant des symptômes) et de l'incidence (proportion de feuilles présentant des symptômes) pour les maladies du feuillage et l'incidence des symptômes sur les épis.

Données météorologiques et variables synthétiques

En raison du grand nombre d'essais menés dans de nombreux endroits différents (certains en stations des partenaires, mais beaucoup chez des agriculteurs), les données météo pour chaque site expérimental - année n'ont pas enregistré systématiquement pendant la durée des expérimentations. On a décidé d'utiliser la base de données météorologiques spatialisée de Météo-France, SAFRAN, qui couvre la période 1970 à nos jours sur l'ensemble du territoire de métropole. Ces données sont issues d'une réanalyse des observations disponibles à l'aide d'un modèle atmosphérique et interpolées sur une grille avec des mailles de 8 km. Les essais n'étant pas tous géoréférencés, nous avons donc choisi de représenter les conditions climatiques à chaque site par des conditions météorologiques du centre administratif du département le plus proche.

Les notations des maladies ayant été faites en fin du développement de la culture, nous avons choisi des variables climatiques synthétiques qui représentent la dernière partie de la croissante (de mars à fin juin). Chaque site-année est caractérisé par 6 variables moyennes au cours de ces quatre mois : Tn (moyenne des températures minimales quotidiennes), Tx (moyenne des températures maximales quotidiennes), RR (moyenne des précipitations journalières), FRD (fraction de jours de pluie), RH (moyenne de l'humidité relative moyenne quotidienne) et GR (moyenne rayonnement quotidien). La distribution de ces variables synthétiques est résumée dans la figure 4.

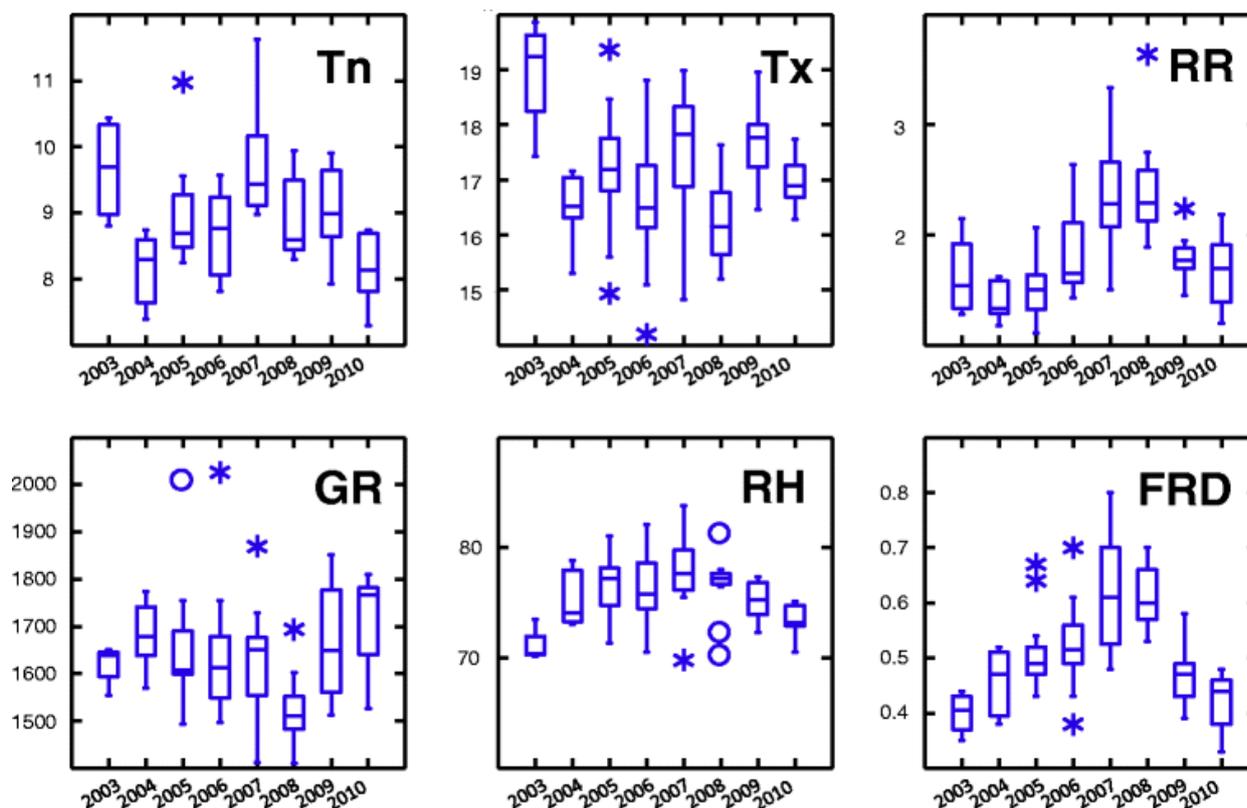


Figure 4. Boxplots des variables météorologiques synthétiques sur la période mars à fin juin pour les années 2003 à 2010 : Tn (°C, moyenne des températures minimales quotidiennes), Tx (°C, moyenne des températures maximales quotidiennes), RR (mm, moyenne des précipitations journalières), FRD (-, fraction de jours de pluvieux), RH (% , moyenne de l'humidité relative moyenne quotidienne) et GR (kJ.m-2, moyenne rayonnement quotidien).

Démarche d'analyse statistique

1. **La première étape** consiste à aborder le problème des grandes variances constatées dans l'intensité des maladies observées et choisir une transformation appropriée de ces données. Les distributions d'intensité des maladies sont analysées pour déterminer la catégorisation la plus pertinente.
2. **La seconde étape** est l'identification des syndromes de la santé des plantes. Pour cela, les données sur les maladies (catégorisées) des 3525 parcelles sont utilisées en considérant chacune comme une réalisation d'un ou plusieurs syndromes de maladies possibles touchant l'ensemble de la population. Une classification hiérarchique est réalisée en utilisant le critère de Ward et la distance du χ^2 .
3. **La troisième étape** consiste à examiner les profils de sensibilité aux maladies des variétés de blé expérimentées. La réponse de la maladie d'une variété donnée est considérée comme une fonction de son génotype, de l'année climatique mais également de la gestion des cultures. Idéalement, cette analyse aurait dû être effectuée en l'absence de toute utilisation de fongicides. Pour la base "blé rustique", elle aurait dû être menée sur les parcelles CMGT4. Cependant, CMGT4 était représenté par seulement 321 parcelles avec certaines variétés pas ou très mal représentés. Cette analyse a donc été menée sur des parcelles appartenant au niveau CMGT3 de gestion des cultures (1572 parcelles), où l'utilisation du fongicide est relativement faible, où les cinq maladies ont été enregistrées, avec une variabilité relativement faible. On a ainsi obtenu les valeurs moyennes et les variances des maladies pour chaque variété. Une analyse de classification hiérarchique a été réalisée, sur la base de la moyenne et des écarts-types des cinq maladies sur toutes les parcelles CMGT3. L'analyse de cluster a utilisé la distance euclidienne et le critère Ward.
4. **La quatrième étape** a analysé le niveau et la significativité des associations entre les méta-variables générées (syndromes des maladies et groupes de variétés) et les variables individuelles

(niveaux de maladie et années climatiques). Ces associations ont été évaluées avec des tests de χ^2 sur les tableaux de contingence correspondants.

5. **La cinquième étape** a analysé la nature et la variabilité des niveaux de gestion des cultures (CMGT1-4) afin de mieux qualifier la nature de ce facteur dans les analyses. Une analyse en composantes principales a été réalisée, impliquant les niveaux des intrants sur les parcelles de blé des différentes années et sites.
6. **La sixième étape** a consisté à générer une vue d'ensemble des liens multiples entre les années climatiques et les niveaux de la maladie, les variétés et les groupes de variétés, et la gestion des cultures à l'aide d'une analyse des correspondances multiples. Cette étape permet de rassembler les résultats intermédiaires des étapes précédentes. Une analyse des facteurs de risque impliquant des régressions logistiques est proposée dans cette dernière étape. La probabilité d'apparition d'épidémies de maladies a été considérée comme le résultat d'une série de facteurs prédictifs : années climatiques, la gestion des cultures et des groupes de variétés.

Résultats obtenus

Distribution des intensités de maladies (étape 1)

Les distributions des cinq maladies sont fortement asymétriques, avec une très grande proportion de parcelles présentant très peu ou pas de maladie et peu de situations avec des grandes intensités de maladies (figure 5).

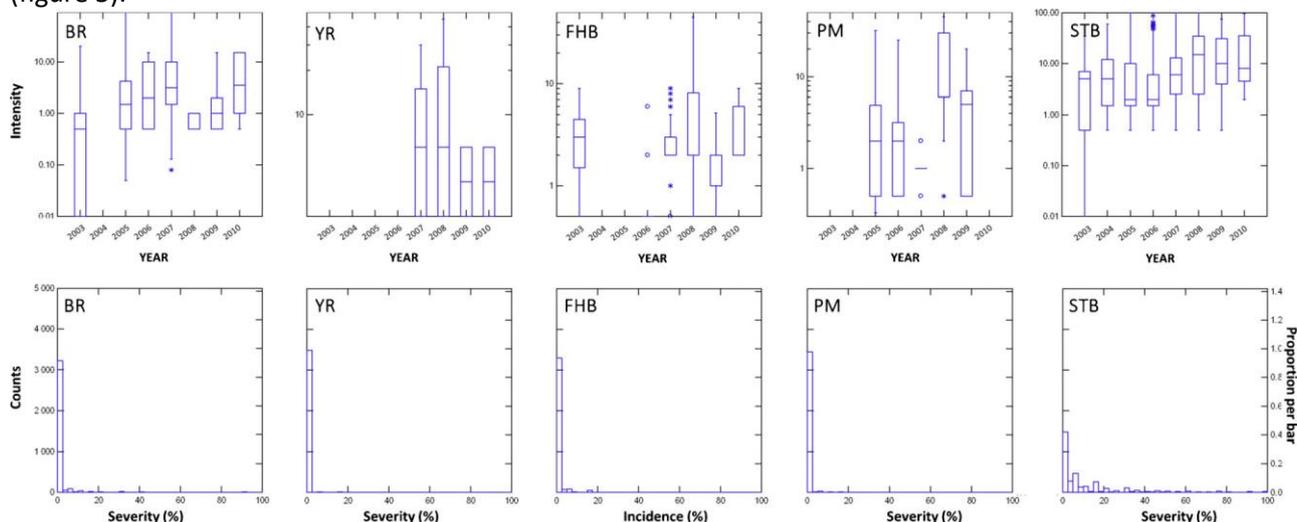


Figure 5. Distribution globale (en bas) et box-plots (en transformation log) des maladies pour les différentes années. Maladie : la rouille brune (BR), la rouille jaune (YR), la fusariose (FHB), l'oïdium (PM) et la septoriose (STB).

Sur cette base, nous avons décidé de la transformation de ces données en deux classes (transformation binaire) : absence de maladie (0) et présence (1). Ces données transformées sont utilisés pour la suite.

Groupes de variétés par analyse de classification hiérarchique sur CMGT3 (étape 3)

La classification hiérarchique sur les variétés sur la base des observations des cinq maladies sur l'itinéraire technique CMGT3 (utilisation limitée des pesticides) nous permet de distinguer trois groupes (A, B, C) (figure 6).

Le groupe A, composé de 16 variétés, correspond à des niveaux de maladie modérément bas en général, sauf pour YR (niveaux modérés).

Le groupe B, avec 12 variétés, correspond à des niveaux modérément faibles de BR, YR et FHB et à des niveaux modérés de PM et de STB.

Le groupe C, avec 17 variétés, correspond à des niveaux comparativement plus élevés de BR, YR, FHB et STB, et des niveaux modérés de PM.

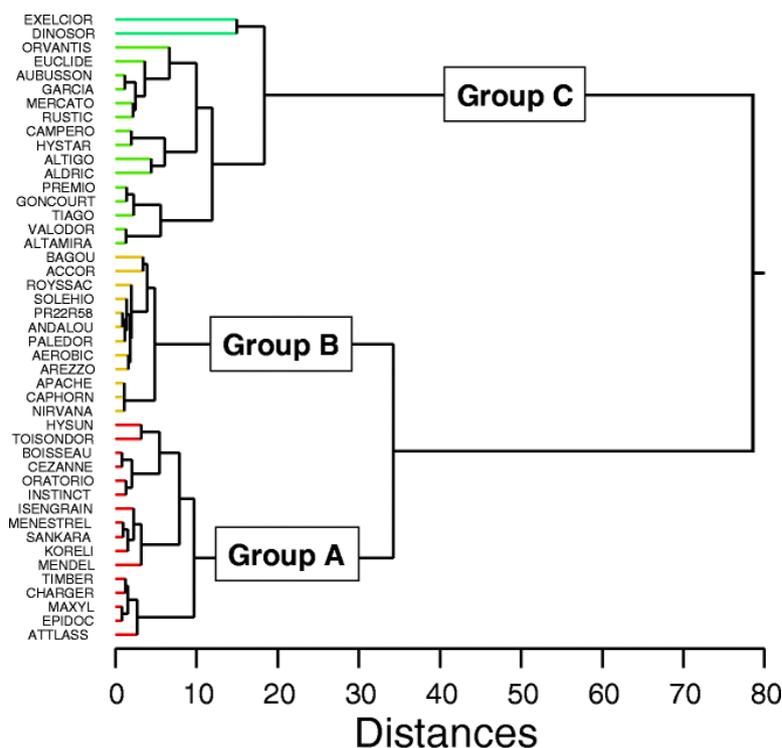


Figure 6.: Analyse hiérarchique des variétés de blé basée sur les intensités de maladie observées. L'analyse a été effectuée sur un ensemble de données où chaque variété de blé est représentée par sa sévérité moyenne de la maladie (non transformée) et les écarts types associés à toutes les parcelles sous CMGT3. Les cinq maladies (BR, YR, STB, PM et FHB) ont été impliquées dans l'analyse.

Force des associations entre variables (4ème étape)

Sur la base de test de chi2, on évalue la force des liens entre les différentes variables (table 1).

X-variable	Y-variable	Pearson Chi-square	df	P
YEAR	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
CMGT	CLUSDISEASE	1005.13	14	< 0.001
	BRBIN	31.87	3	< 0.001
	YRBIN	50.21	3	< 0.001
	FHBBIN	40.38	3	< 0.001
	PMBIN	21.22	3	< 0.001
CLUSDISEASE	STBBIN	82.06	3	< 0.001
	CLUSDISEASE	32.48	6	< 0.001
	BRBIN	1621.88	2	< 0.001
	YRBIN	30.06	2	< 0.001
	FHBBIN	289.59	2	< 0.001
VARGROUP	PMBIN	115.88	2	< 0.001
	STBBIN	1624.50	2	< 0.001
	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

df degrees of freedom of the Chi-square test; P P-value associated with the Pearson's Chi-square test

Table 1. Test du chi2 entre les niveaux de maladies du blé (CLUSDISEASE), la gestion des cultures (CMGT), les groupes de variétés (VARGROUP), et les années (YEAR)

Dans l'ensemble, l'association des réponses aux maladies avec les années climatiques est très grande, suivie de l'association avec les groupes de variétés, tandis que les associations avec la gestion des cultures sont plus faibles.

Analyse des facteurs de risque (étape 6)

Les régressions logistiques (table 2) fournissent des estimations quantitatives de la contribution des années climatiques, des groupes de variétés et de la gestion des cultures à la probabilité d'occurrence épidémique pour chacune des cinq maladies considérées. Dans chacune des cinq régressions logistiques testées, les années climatiques (ANNEE), les groupes de variétés (VARGROUP) et la gestion des cultures (CMGT) sont donc considérés comme des prédicteurs possibles des épidémies détectées dans l'ensemble de données.

Disease	Likelihood ratio ^a		Area under ROC curve ^b	Parameter statistics by component (year, variety group, crop management)				
	LR	P		Parameter ^c	Estimate ^d	SE	P	Odds ratio
BR brown rust <i>n</i> = 670 epidemics	1383.779	<0.001	0.902	Constant	-1.925	0.317	<0.001	-
				VARGROUP-A	-0.272	0.147	0.064	0.762
				VARGROUP-B	-0.391	0.147	0.008	0.676
				CMGT1	-1.568	0.460	0.001	0.208
				CMGT2	-1.972	0.207	<0.001	0.139
				CMGT3	-1.143	0.194	<0.001	0.319
				Year 2003	2.984	0.415	<0.001	19.760
				Year 2004	NA ⁽¹⁾	NA ⁽¹⁾	NA ⁽¹⁾	NA ⁽¹⁾
				Year 2005	1.694	0.331	<0.001	5.442
				Year 2006	0.366	0.395	0.353	1.442
				Year 2007	4.556	0.336	<0.001	95.215
				Year 2008	-0.541	0.397	0.173	0.582
				Year 2009	1.442	0.355	<0.001	4.227
YR yellow rust <i>n</i> = 55 epidemics	152.943	<0.001	0.907	Constant	-3.719	0.732	<0.001	-
				VARGROUP-A	0.760	0.305	0.012	2.140
				VARGROUP-B	-1.217	0.631	0.054	0.296
				CMGT1	NA ⁽²⁾	NA ⁽²⁾	NA ⁽²⁾	NA ⁽²⁾
				CMGT2	-2.928	0.481	<0.001	0.054
				CMGT3	-1.475	0.351	<0.001	0.229
				Year 2003	NA ⁽²⁾	NA ⁽²⁾	NA ⁽²⁾	NA ⁽²⁾
				Year 2004	NA ⁽²⁾	NA ⁽²⁾	NA ⁽²⁾	NA ⁽²⁾
				Year 2005	NA ⁽²⁾	NA ⁽²⁾	NA ⁽²⁾	NA ⁽²⁾
				Year 2006	NA ⁽²⁾	NA ⁽²⁾	NA ⁽²⁾	NA ⁽²⁾
				Year 2007	1.694	0.803	0.035	5.442
				Year 2008	2.051	0.749	0.006	7.777
				Year 2009	0.228	1.016	0.823	1.256
FHB Fusarium head blight <i>n</i> = 467 epidemics	815.548	<0.001	0.864	Constant	-2.682	0.295	<0.001	-
				VARGROUP-A	-0.252	0.140	0.072	0.777
				VARGROUP-B	0.127	0.146	0.384	1.135
				CMGT1	1.278	0.465	0.006	3.589
				CMGT2	0.928	0.266	<0.001	2.530
				CMGT3	1.348	0.264	<0.001	3.850
				Year 2003	1.768	0.300	<0.001	5.861
				Year 2004	NA ⁽³⁾	NA ⁽³⁾	NA ⁽³⁾	NA ⁽³⁾
				Year 2005	NA ⁽³⁾	NA ⁽³⁾	NA ⁽³⁾	NA ⁽³⁾
				Year 2006	-2.944	0.488	<0.001	0.053
				Year 2007	-0.694	0.231	0.003	0.499
				Year 2008	1.179	0.200	<0.001	3.250
				Year 2009	-0.507	0.259	0.050	0.602

Table 2. Extrait des régressions logistiques de l'apparition des épidémies pour les différentes maladies de blé (BR, YR, FHB) avec les années, les groupes de variétés et les niveaux de gestion des cultures

Par exemple, dans le cas de la rouille brune (BR), les années 2003, 2005, 2007 et 2009 (année 2010 : référence) sont positivement et significativement associées à la probabilité d'avoir des épidémies. En particulier, les *odds ratios* très importants obtenus pour les années 2003 et 2007 indiquent leur forte association avec les épidémies. Les groupes de variétés A et B (C : référence) sont significativement associés aux non-épidémies de BR, et CMGT1-3 (CMGT4 : référence) sont également significativement associés aux non-épidémies.

Les autres régressions logistiques peuvent être interprétées de la même manière. Dans le cas de la rouille jaune (YR), les années climatiques 2007 et 2008 et le groupe de variétés A sont significativement associés aux épidémies, tandis que les niveaux 2 et 3 de gestion des cultures sont associés à des situations non

épidémiques.

Dans le cas de la fusariose des épis (FHB), les années 2003 et 2008 sont des prédictors significatifs des épidémies, et 2006, 2007 et 2009 sont des prédictors significatifs des situations non-épidémiques. Le groupe de variétés A est un prédictor faible des non épidémies, tandis que les facteurs de gestion des cultures (CMGT1, CMGT2 et CMGT3) sont tous des prédictors significatifs des épidémies.

Motifs d'associations maladie-climat

La figure 7 montre les relations entre climat et maladie. Quatre quadrants, «pluvieux,« froid », sec» et «chaud» peuvent être identifiés sur ce graphique. Les situations non-épidémiques (br0, YR0, FHB0, pM0 et STB0) sont regroupées à l'origine des axes, ce qui indique leur présence prédominance pour des conditions climatiques neutres. L'apparition de la rouille brune (BR1) est fortement associée à des températures chaudes (Tx4, Tn3). La fusariose (FHB1) est fortement associée à des pluies (RR4). La jaune rouille (YR1) semble correspondre à des situations froides (Tx1, Tn2). La présence de l'oïdium (PM1) semble associée à des conditions climatiques intermédiaires, impliquant à la fois des conditions pluvieuses, mais pas à l'extrême. Enfin, la présence de septoriose (STB1) apparaît principalement associée à des conditions pluvieuses, quelle que soit la température.

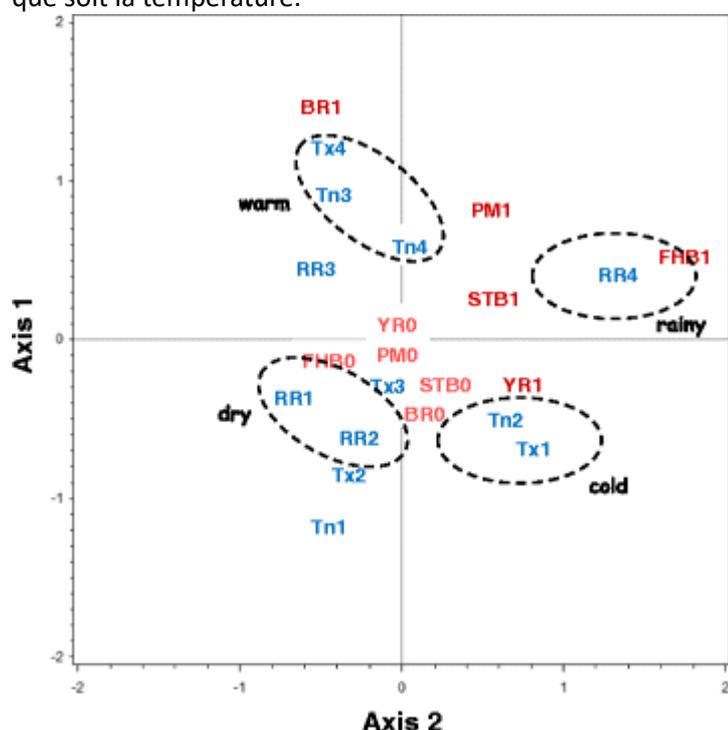


Figure 7. Analyse des correspondances multiples des niveaux des maladies binarisées et des 4 classes des variables climatiques synthétiques. Les niveaux des maladies : non-épidémique (0) et épidémique (1) de la rouille brune (BR), la rouille jaune (YR), la fusariose (FHB), l'oïdium (PM) et la septoriose (STB). Les classes des variables climatiques selon les quartiles des distributions pour la moyenne journalière des températures maximale (Tx), minimale (Tn), des précipitations quotidiennes (RR) sont indexés de 1 à 4. Les axes 1 et 2 représentent 16,15 et 13,35% de l'inertie totale, respectivement. Les ellipses en pointillé et commentaires (warm, rainy, dry, cold) sont les interprétations.

Discussion et conclusion

Les conclusions ne sont pas surprenantes : effet fort du climat, puis du levier variétal et enfin bien après celui des pratiques. Mais, nous avons quantifié finement ces différents effets de manière objective.

Enfin, nous proposons une démarche d'analyse structurée qui est mise en œuvre en détail sur cette base de données blés rustiques et qui peut ainsi inspirer d'autres travaux sur des données analogues, notamment les réseaux d'essais Dephy Expé.

4. Contribution au plan Ecophyto (et à l'agroécologie)

Si les objectifs du point de vue de la valorisation scientifique ont été atteints, nous n'avons pas en fin de projet de sortie opérationnelle à destination des acteurs des réseaux DEPHY ferme ou BSV. La démarche décrite dans les deux principaux articles scientifiques sur le réseau blé rustique, qui constitue un réseau DEPHY EXPE avant l'heure, est détaillée et peut servir de guide à certains porteurs de ces réseaux d'expérimentation qui ont des objectifs et dispositifs très similaires.

Cette démarche doit permettre d'enrichir les analyses dans le cadre des réseaux DEPHY en fournissant une information complémentaire à celle fournie actuellement, pour les acteurs des réseaux fermes pour les accompagner dans leur modification de pratique dans le but de réduire les intrants phytosanitaires, mais aussi pour alimenter les réflexions lors de la construction des dispositifs expérimentaux testés dans le cadre du dispositif expérimentation, puis de leur analyse.

Pour aller plus loin, nous sommes à la disposition des acteurs du réseau DEPHY EXPE pour les accompagner dans l'appropriation de la démarche et sa mise en œuvre.

Retour sur une question du séminaire de Saint Malo (1 et 2 octobre 2015). Comment prendre en compte des éléments de modulation : pratiques ? Dans PEBiP, notre approche permet de hiérarchiser le poids des pratiques sur des jeux de données croisant différents niveaux de pratiques et suivi de l'état sanitaire. Ainsi, dans le cas des blés rustiques : génétique >>> autres pratiques. Ces types de jeux de données restent insuffisants pour caractériser/quantifier finement les autres leviers. Avec les jeux de données de type observatoire (dephy ferme), on aurait certes une plus grande gamme de situations, mais la qualité du suivi sanitaire est certainement insuffisante pour dégager des effets. A titre de comparaison, les données d'épidémiosurveillance (mobilisées dans le projet SynOEM) présentent un suivi sanitaire plus homogène (avec des protocoles harmonisés), avec moins de variabilité de pratique et des situations en "rythme de croisière". Pour autant, avec ces données, on peine à montrer avec assez de puissance statistique des effets reconnus comme forts (variétés et date de semis sur septoriose du blé), par rapport aux autres sources de variabilité non qualifiées qui restent très importantes.

5. Rapport financier

En annexe

Annexe

- **Article 1. Assessing plant health in a network of experiments on hardy winter wheat varieties in France: multivariate and risk factor analyses.** Auteurs : Serge Savary, Céline Jouanin, Irène Félix, Emmanuelle Gourdain, François Piraux, Laetitia Willocquet and François Brun. *European Journal of Plant Pathology* (2 mai 2016). DOI 10.1007/s10658-016-0955-1

Abstract

A large network of field experiments has been conducted over several years across France to identify combinations of winter wheat cultivars and management practices in which partial resistances under limited chemical protection would achieve adequate disease management, while leading to satisfactory yield performance, and so 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*). Hierarchical cluster analysis led to the identification of three variety groups associated with (1) moderate-low disease levels in general, except for YR (moderate levels) – 16 varieties; (2) moderate-low BR, YR, and FHB levels, and moderate PM and STB levels – 12 varieties; (3) comparatively higher BR, YR, FHB, and STB levels, and moderate PM levels – 17 varieties. The association of disease levels represented as binary categories (i.e., epidemics vs. non-epidemics) with climatic years corresponded to chi-square values ($\chi^2 = 87.0\text{--}1402$) that were one to two orders of magnitude larger than the values corresponding to the associations of diseases with variety groups ($\chi^2 = 6.41\text{--}321$) or with levels of crop management ($\chi^2 = 21.2\text{--}82.1$). Multivariate non parametric analyses indicated the existence of three disease syndromes, two of which being dominated by BR or STB, and a third associated with diverse diseases and frequent FHB. This suggests that STB and BR might each be considered as key-stone species dominating specific wheat disease syndromes. Multiple correspondence analysis highlighted the linkages between multiple epidemic occurrence and the three characterized variety groups. Risk factors analyses conducted through logistic regressions provided quantitative estimates of the contribution of climatic years, variety groups, and crop management, to the likelihood of epidemic occurrence for each of the five diseases considered. 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.

Keywords

Categorical data, Risk factor, Multiple pathosystem, Crop management, Agricultural extensification, Sustainable agriculture

- **Article 2. Assessing plant health in a network of experiments on hardy winter wheat varieties in France: patterns of disease-climate associations.** Auteurs : Serge Savary, Céline Jouanin, Irène Félix, Emmanuelle Gourdain, François Piraux, Laetitia Willocquet and François Brun. *European Journal of Plant Pathology* (2 mai 2016). DOI 10.1007/s10658-016-0954-2

Abstract

A data set generated by a multi-year (2003–2010) and multi-site network of experiments on winter wheat varieties grown at different levels of crop management is analysed in order to assess the importance of climate on the variability of wheat health. Wheat health is represented by the multiple pathosystem involving five components: leaf rust, yellow rust, fusarium head blight, powdery mildew, and septoria tritici blotch. An overall framework of associations between multiple diseases and climate variables is developed. This framework involves disease levels in a binary form (i.e. epidemic vs. non-epidemic) and synthesis variables accounting for climate over spring and early summer. The multiple disease-climate pattern of associations of this framework conforms to disease-specific knowledge of climate effects on the components of the pathosystem. It also concurs with a (climate-based) risk factor approach to wheat diseases. This report emphasizes 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

Puccinia triticina, *Puccinia striiformis*, *Fusarium graminearum*, *F. culmorum*, *F. avenaceum*, *Blumeria graminis*, *Zymoseptoria tritici*, Categorical data, Risk factor, Multiple pathosystem, Correspondence analysis, Logistic regression