

Végéphyll – 12^e CONFÉRENCE INTERNATIONALE SUR LES MALADIES DES PLANTES
TOURS – 11 ET 12 DÉCEMBRE 2018

QUANTIFICATION DE L'EFFICACITE DES PRATIQUES DE CONTROLE DES MALADIES DES
GRANDES CULTURES EN FRANCE

N. DEVAUD ⁽¹⁾ ET C. BARBU⁽¹⁾

⁽¹⁾UMR Agronomie INRA, avenue Lucien Brétignères 78850 Thiverval-Grignon

RÉSUMÉ

A l'heure où l'opinion publique pousse à une réduction de l'utilisation des pesticides, l'efficacité et la nécessité des pratiques agricoles actuelles sur la protection des cultures est sur la sellette (Delbos *et al.*, 2014; Duru *et al.*, 2014; Bonaudo *et al.* 2014). Les pertes de rendement moyennes induites par les bioagresseurs sont mal connues du fait de la grande variabilité de présence des bioagresseurs et de l'apparition régulière de résistances qui dégradent l'efficacité des traitements (Comins, 1977; Jutsum *et al.*, 1998). De plus les estimations disponibles sont généralement des pertes maximales et non moyennes, estimées en comparant des bandes traitées et non - traitées. Cela ne permet pas l'estimation de l'impact des bioagresseurs non évitée par le traitement. Ici, nous analysons des données de suivis d'épidémiosurveillance de 13 maladies et de 12 insectes dans toute la France sur une période de 9 ans. La pression de chaque bio- agresseur est calculée à l'échelle du département à partir des observations faites sur l'année. Plusieurs modèles sont ensuite testés afin de prédire l'impact d'un groupe de bio-agresseurs sur le rendement départemental de leur culture cible. Nous montrons que la majorité des bio-agresseurs étudiés n'a globalement pas d'impact significatif sur le rendement, ce qui suggère qu'ils sont bien contenus à l'échelle nationale par les différents traitements appliqués sur blé, orge et colza. La septoriose (*Septoria tritici*) et le puceron des épis (*Sitobion avenae*) sur blé, ainsi que les charançons du bourgeon et des siliques sur colza apparaissent comme les plus problématiques car ayant un impact négatif significatif dans la plupart des modèles testés.

Mots-clés : maladies, ravageurs, rendement, modélisation, bilan.

ABSTRACT

QUANTIFICATION OF THE EFFECTIVENESS OF DISEASE CONTROL PRACTICES FOR FIELD CROPS IN FRANCE

As public opinion is pushing for a reduction in pesticide use, the effectiveness and necessity of current agricultural practices for crop protection is under threat (Durand *et al.*, 2013; Delbos *et al.*, 2014; Duru *et al.*, 2014; Bonaudo *et al.*, 2014). The average yield losses induced by pests and diseases are poorly known due to the high variability of the presence of bio-agressors and the regular appearance of resistance that degrades the effectiveness of treatments (Comins, 1977; Jutsum *et al.*, 1998). In addition, the available estimates are generally maximum and not average losses, estimated by comparing treated and untreated plots. This does not allow the estimation of the impact of pests and diseases not avoided by the treatment. Here, we analyze epidemiological surveillance data for 13 diseases and 12 insects throughout France over a period of 9 years. The pressure of each bio-aggressor is calculated at the departmental level from observations made over the year. Several models are then tested to predict the impact of a group of bio-aggressors on the departmental performance of their target crop. We show that the majority of the pests studied do not have a significant overall impact on yield, suggesting that they are well contained nationally by the different treatments applied to wheat, barley and rapeseed. *Septoria tritici* (*Septoria tritici*) and ear aphid (*Sitobion avenae*) on wheat, as well as bud weevils and silica on rapeseed appear to be the most problematic because they have a significant negative impact in most of the models tested

Keywords: diseases, pests, yield, modelling, summary.

INTRODUCTION

Les conséquences négatives de l'utilisation des produits phytosanitaires sur l'environnement et sur la santé humaine conduisent aujourd'hui l'opinion publique française et européenne à réclamer une réduction de leur utilisation (Delbos *et al.*, 2014). La question de leur efficacité et de leur nécessité est désormais devenu un sujet majeur (Duru *et al.*, 2014; Bonaudo *et al.*, 2014), d'autant plus que de nombreux nuisibles développent régulièrement des capacités de résistance (Comins, 1977; Jutsum *et al.*, 1998), favorisant la recherche de nouveaux produits. Les grandes cultures, bien que relativement peu traitées par rapport à l'arboriculture ou à la vigne (Ministère de l'agriculture, 2011) représentent un enjeu majeur du fait des très grandes surfaces concernées (<http://agreste.agriculture.gouv.fr/donnees-de-synthese/statistique-agricole-annuelle-saa/>).

A ce titre il apparaît important d'évaluer les pertes de rendements induites par l'activité des bioagresseurs des cultures, compte tenu des pratiques agricoles actuelles. Cela implique de ne pas considérer les bioagresseurs séparément comme cela est classiquement fait mais directement leur ensemble afin d'être au plus proche des conditions réelles de culture (Padwick, 1956; McRoberts, 2003; Savary *et al.*, 2006).

Quantifier les dommages qu'ils provoquent n'est pas simple, et ce d'autant que les conditions favorables pour certains bioagresseurs sont souvent semblables aux conditions nécessaires à la croissance des plantes (Fones, 2015). Ils sont par ailleurs fortement dépendants des contextes agricoles et pédoclimatiques (Savary *et al.*, 2006). De manière intuitive, il s'agit de comparer le rendement avec protection phytosanitaire d'une culture au rendement pouvant être atteint en l'absence totale de bioagresseurs, toute chose étant égale par ailleurs. On parle alors de rendement atteignable (FAO, 2015). Cette approche dite du "yield gap" est régulièrement utilisée dans la recherche agronomique, et peut se décliner de différentes façons. En suivant cette démarche on peut en effet déterminer quelle est la perte de rendement liée à un déficit hydrique, de fertilisation etc.

Les pertes maximales causées par les principaux bioagresseurs des grandes cultures sont généralement connues. Elles peuvent être calculées a posteriori en comparant les rendements des bandes traitées et non traitées au sein d'une même parcelle expérimentale (Chevalier-Gérard *et al.*, 1994; Savary *et al.*, 2006).

Ces pertes maximales ne permettent cependant pas d'évaluer dans quelle mesure les maladies induisent aujourd'hui un déficit de production dans les conditions de protection fongicides actuelles, et dans quelles proportions. Les données d'épidémiosurveillance, notamment disponibles pour les grandes cultures et associées aux données de rendement du ministère, représentent une opportunité d'évaluer les corrélations entre bioagresseurs et rendement et donc le déficit de production possiblement associé aux bioagresseurs dans les conditions habituelles de traitement.

Afin de prendre en compte un large échantillon des bioagresseurs pouvant avoir un impact important sur le rendement et éviter l'attribution à une maladie de pertes liées à un autre bioagresseur qui lui soit corrélé, nous avons étudié ici l'ensemble des bioagresseurs maladies et insectes entrant dans le top 20 des observations rapportées dans la base d'épidémiosurveillance Vigicultures® entre 2009 et 2016.

MATERIEL ET MÉTHODE

L'ensemble des traitements de données a été réalisé avec le logiciel R.

QUANTIFICATION DE LA PRESSION BIOAGRESSEUR

Les données d'observations des bio-agresseurs proviennent de la base de données Vigicultures®. Elle rassemble des suivis de parcelles en grandes cultures réalisés par divers acteurs coordonnés au sein du réseau d'épidémiosurveillance depuis 2009 en France (hors Bretagne, Limousin et Alsace). Ces observations hebdomadaires de parcelles pendant la période de végétation portent sur l'ensemble des insectes et maladies pouvant être présents à la période donnée.

Ces mesures étant hebdomadaires et à la parcelle, les comparer aux mesures de rendement impose une agrégation au département et à l'année. En cohérence avec l'utilisation fréquente de seuils de nuisibilité, nous comptabilisons le nombre de dépassements de seuil dans chaque parcelle pour chaque bioagresseur puis agrégeons ces mesures à l'échelle départementale.

Bioagresseurs, métriques étudiées et calculs de seuils

Plusieurs métriques peuvent être utilisées dans les bases d'épidémiosurveillance pour quantifier la présence ou la nuisibilité d'un bioagresseur. Dans un souci de cohérence, nous n'avons sélectionné que la métrique la plus utilisée dans les relevés pour calculer la pression d'un bioagresseur. Trois caractérisations des abondances ont été testées en utilisant trois seuils, différents pour chaque bioagresseurs, et basés sur les valeurs prises par les observations (Tableau I):

- Seuil médian : Pour chaque parcelle-année, la moyenne des observations est calculée, puis le seuil choisi correspond à la médiane de ces valeurs sur l'ensemble des parcelles et des années.
- Seuil bas et seuil haut: Lors de la saisie des données d'épidémiosurveillance, des classes de gravité indicatives sont fournies aux observateurs qui les utilisent de manière variable, rapportant soit des valeurs d'abondance absolues soit des valeurs correspondant aux limites inférieures de ces classes. Nous utilisons ici comme seuil 'bas' la valeur d'entrée dans la seconde classe et comme seuil haut la valeur d'entrée dans la dernière classe.

Tableau I : Récapitulatif des métriques utilisées pour chaque bioagresseur
Summary of the metrics used for each bioagressor.

Bioagresseur	Culture	Métrique	Seuil médian	Seuil bas	Seuil haut
Cécidomyie	Blé d'hiver	Nb de cécidomyies par pièges	0,67	5	20
Limaces	Blé d'hiver	% de plantules attaquées	0	10	35
Fusariose	Blé d'hiver	% de tiges attaquées	0	10	20
Helminthosporiose du blé	Blé d'hiver	% de feuilles F3 attaquées	0	2	4
Oïdium	Blé d'hiver	% de feuilles F3 attaquées	0	2	4
Piétin échaudage	Blé d'hiver	% de racines nécrosées	0	10	20
Puceron d'automne	Blé d'hiver	% de plantes attaquées	0	10	20
Puceron des épis	Blé d'hiver	% d'épis attaqués	0	10	20
Piétin verse	Blé d'hiver	% de tiges atteintes	0	10	20
Rouille brune	Blé d'hiver	% de feuilles F3 attaquées	0	2	4
Rouille jaune	Blé d'hiver	% de feuilles F3 attaquées	0	2	4
Septoriose	Blé d'hiver	% de feuilles F3 attaquées	2,3	2	4
Charançon du bourgeon terminal	Colza	Nb de charançons par piège	0,57	1	6
Charançon des siliques	Colza	Nb de charançons par plante	0,012	1	1
Charançon de la tige	Colza	Nb de charançons par piège	1,6	1	6
Altise d'hiver	Colza	Nb d'altises par piège enterré	1,5	1	6
Sclerotinia	Colza	% de fleurs attaquées	45	30	50
Meligèthe	Colza	% de plantes avec présence d'insectes	20	25	75
Puceron cendré	Colza	Nb de colonies de puceron au m ²	0	0	2
Phoma	Colza	% de plantes avec nécroses au collet	0	10	20
Puceron vert	Colza	% de plantes avec présence de pucerons	0	1	20
Helminthosporiose de l'orge	Orge d'hiver	% de feuilles F3 attaquées	1,5	2	4
Rhynchosporiose	Orge d'hiver	% de feuilles F3 attaquées	1,16	2	4

Calcul de la pression de bioagresseur départementale annuelle

Nous testons deux manières d'agrèger à l'échelle départementale les mesures hebdomadaires à la parcelle. La première est simplement le taux d'observations dépassant le seuil de traitement dans le département. Ce taux peut malheureusement être d'une pertinence limitée pour certains départements où le nombre d'observations est très réduit, la valeur de pression étant alors rapidement saturée à 0 ou 1. Pour remédier à cela, nous avons testé une autre méthode où la pression est donnée par un modèle mixte binomial du taux d'observation avec un effet aléatoire sur l'interaction entre le département observé et l'année d'observation (package R glmer).

Modélisation du rendement

Les rendements annuels des différentes cultures étudiées proviennent de la base de données Agreste du Ministère de l'Agriculture et de l'Alimentation français accessible en ligne (<https://stats.agriculture.gouv.fr/disar-web/accueil.disar>). Il s'agit de rendements moyens à l'échelle départementale (Figure 1).

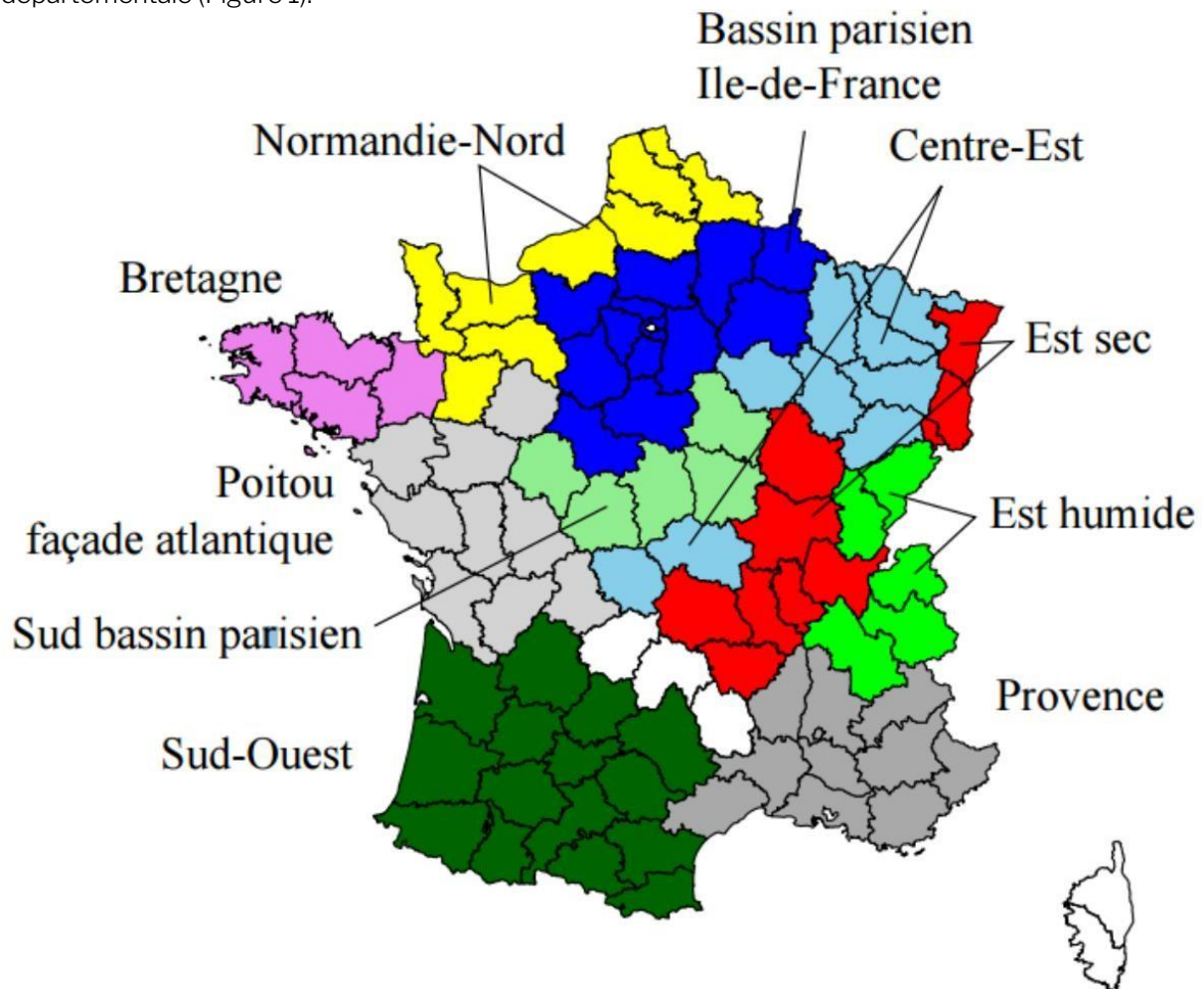


Figure 1 : Carte des différentes régions agro-climatiques en France
Map of the different agro-climatic regions in France

Les fortes variations du rendement pour des raisons climatiques et indépendamment de la présence de bioagresseurs peuvent brouiller de manière importante la relation entre bioagresseurs et rendement. Pour cela des estimations du rendement atteignable sont couramment utilisées, mais leur choix est encore sujet à discussion (Savary, 2012). Pour cette raison, plutôt que de s'en tenir à une estimation probablement imparfaite, nous utilisons plusieurs modélisations complémentaires et rapportons l'ensemble des résultats, ce qui permet d'évaluer leur cohérence et d'éventuelles tendances. En particulier, nous avons estimé la corrélation entre rendement et bioagresseurs avec ou sans rendement atteignable estimé à partir de données climatiques. Nous avons aussi utilisé des proxys du rendement atteignable, c'est à dire des variables n'étant pas en elles-mêmes significatives mais se substituant au rendement atteignable qui n'est ni observable ni directement mesurable.

Dans tous les cas le rendement a été modélisé comme une régression linéaire simple entre rendement d'une part, et pressions de bioagresseurs d'autre part, ajoutant éventuellement le proxy de rendement atteignable. Pour identifier les corrélations les plus pertinentes, nous avons utilisé une régression LASSO. Le LASSO permet une sélection des variables par validation croisée en imposant une corrélation négative ou nulle entre augmentation des pressions de bioagresseurs et rendement (package R glmnet). Enfin, l'interaction entre grandes régions agro-climatiques (Figure 1) et pressions de bioagresseurs a été prise en compte pour certains modèles pour mettre en évidence la présence de disparités régionales sur l'effet des bioagresseurs sur le rendement.

Modélisation du rendement atteignable

De manière assez classique nous avons d'abord cherché à caractériser le rendement atteignable à partir de données météorologiques et de sol. Nous avons utilisé les données météorologiques du CNRM (Centre National de Recherches Météorologiques) issues du module d'analyse objective SAFRAN. Initialement journalières et par maille, les différentes grandeurs mesurées ont été moyennées par mois et par département. Nous disposons des précipitations journalières moyennes (mm), de l'évapo- transpiration (ETP) journalière moyen, du rayonnement journalier moyen, des températures maximales et minimales journalières moyennes (°C). Par ailleurs, nous avons utilisé l'estimation de la réserve utile des sols faite par GisSOL(<https://www.gissol.fr/>). Les valeurs, en mm, par type de sol ont été moyennées par département.

Pour relier ces données pédologiques et météorologiques aux rendements atteignables nous avons d'abord réalisé une régression GAM-LASSO (package R `gamsel`) sur ces données mensuelles afin de sélectionner les variables les plus pertinentes dans la modélisation du rendement en permettant une relation non linéaire entre les variables climatiques et rendement : Rendement $\sim$ Variables Météo + RéserveUtile

Le rendement atteignable est ensuite prédit par le 9ème décile d'une régression gam quantile réalisée à partir des variables sélectionnées avec le package R `qgam`.

Les cultures de cycle proche comme proxy du rendement

Nous avons pu observer une corrélation importante entre les rendements des 3 espèces de cultures d'hiver (colza, blé tendre et orge). Le rendement départemental de l'orge explique à lui seul plus de 90 % des variations du rendement du blé entre 2009 et 2016, et environ 60 % de celui du colza. Cependant, les cortèges de bioagresseur sont différents d'une culture à l'autre ce qui permet d'utiliser dans notre cas les rendements d'une culture comme proxy du rendement atteignable d'une autre culture car il n'est pas impacté par les bioagresseurs de la culture.

RESULTATS

Les corrélations deux à deux entre bioagresseurs sont faibles. Sur blé, la fusariose et le piétin verse sont les plus corrélés avec un coefficient proche de 0,4. Sur colza, seules les deux altises présentent une corrélation importante, avec un coefficient proche de 0,5. Les deux maladies de l'orge ne présentent pas de corrélation. De manière cohérente, l'analyse des composantes principales des pressions ne fait pas ressortir de composantes décrivant bien l'ensemble de la variabilité des pressions: la composante principale n'explique que 18% de la variabilité des 12 bioagresseurs sur blé, 17% de la variabilité des 9 bioagresseurs sur colza et 55% de la variabilité des 2 bioagresseurs sur orge.

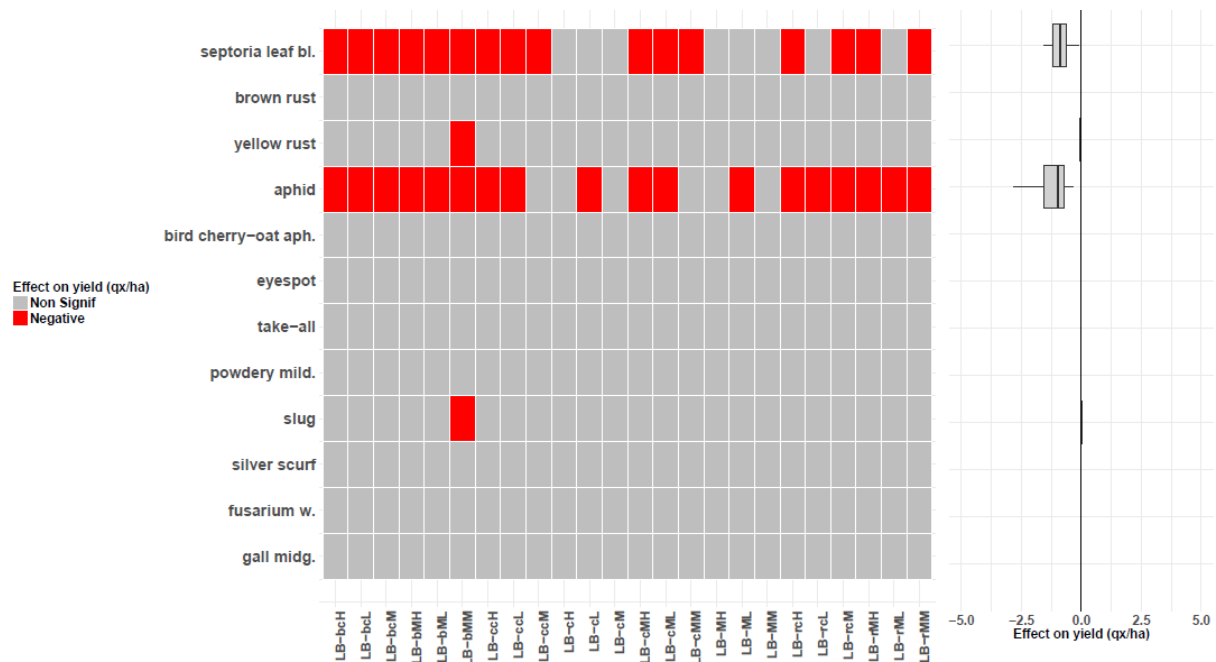


Figure 2 : Matrice de synthèse des résultats des modélisations sur blé d'hiver.

- Les bioagresseurs sont en ordonnées.
 - Les modèles sont en abscisses.
 - Les cases prennent une couleur rouge lorsque la pression des bioagresseurs est corrélée significativement au rendement, grises sinon.
 - Le graphique en boîte représente les pertes moyennes associées dans chaque modèle aux bioagresseurs.
 - 1 : Proxy du rendement atteignable ; b : orge ; c : climatique ; "" : aucun ; r : colza.
 - 2 : Type de pression ; c : classique M : mixte
 - 3 : Seuil : H : haut ; L : bas ; M : moyen.
- **Synthesis matrix of the modelization results obtained on winter wheat.**
- Pests are on the ordinate.
 - Models are on the abscissa.
 - The cells turn red when the pest pressure correlates significantly with the yield, otherwise gray.
 - The box-plot graph represents the average losses associated in each model with pests
- Model name codification : LB - 123 :
- 1: Attainable yield proxy; b: Barley, c: climatic, "": none, r: Rape,
 - 2: Pression type ; c: classical, M: mixed
 - 3: Threshold ; H: High, L: Low, M: Median

Sur l'ensemble de nos modèles on observe que seuls deux bioagresseurs ressortent corrélés au rendement de façon significative : la septoriose et le puceron des épis, avec des pertes moyennes associées de l'ordre de 2qx/ha (Figure 2). Cela confirme le déficit de contrôle sur la septoriose, alors que dans l'ensemble les autres maladies sont relativement bien contrôlées.

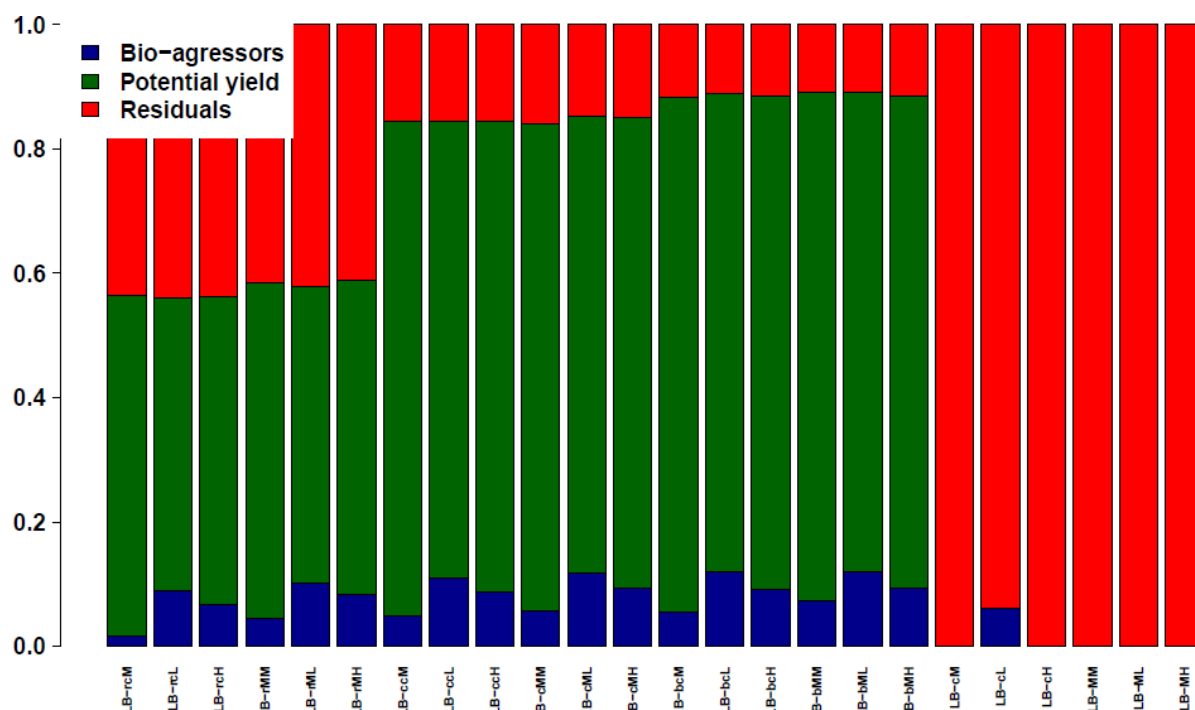


Figure 3 : Part de variance expliquée par les différents paramètres dans chaque modèle (blé d'hiver). Voir figure 2 pour le détail des noms de modèles.

- *Part of variance explained by the different parameters in each model (winter wheat).*
 See Figure 2 for the details on the model names.

La part totale de la variation expliquée par le modèle dépend grandement du proxy du rendement atteignable utilisé (Figure 3). Elle est comprise entre 80 et 85 % avec le proxy "climatique" (modèles LB-c_), environ 90 % avec le proxy « orge » (modèles LB-b_) , entre 50 % et 60 % avec le proxy « colza » (modèles LB-r_) et environ 5 % sans proxy (modèles LB-).

Le pourcentage de variance du rendement expliquée par les bioagresseurs est malgré tout relativement stable entre les modèles puisqu'il oscille entre 5 et 10%. Ainsi entre 3 et 5% des variations de rendement au cours de la période 2009-2016 seraient dus à la septoriose.

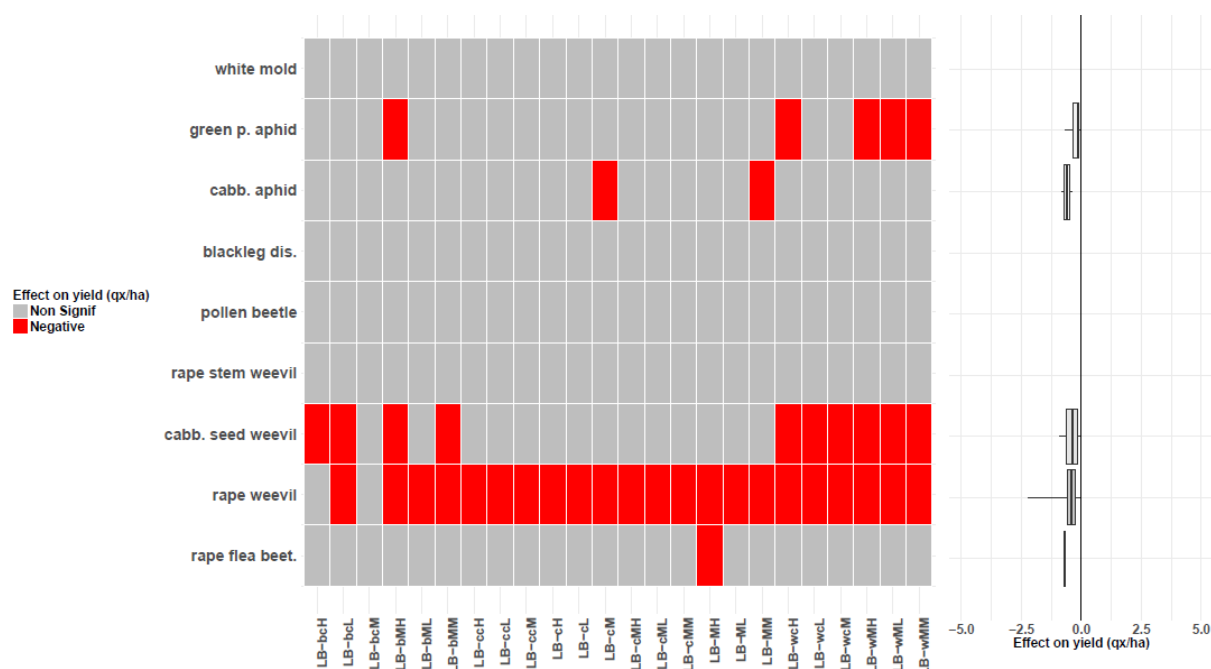


Figure 4 : Matrice de synthèse des résultats des modélisations sur colza.

- Les bioagresseurs sont en ordonnées.
- Les modèles sont en abscisses.
- Les cases prennent une couleur rouge lorsque la pression des bioagresseurs est corrélée significativement au rendement, grises sinon.
- Le graphique en boîte représente les pertes moyennes associées dans chaque modèle aux bioagresseurs.
- 1 : Proxy du rendement atteignable ; b : orge ; c : climatique ; "" : aucun ; w : blé.
- 2 : Type de pression ; c : classique M : mixte
- 3 : Seuil : H : haut ; L : bas ; M : moyen.

- Synthesis matrix of the modelization results obtained on rape.

- Pests are on the ordinate.
- Models are on the abscissa
- The cells turn red when the pest pressure correlates significantly with the yield, otherwise gray.
- The box-plot graph represents the average losses associated in each model with pests

Model name : LB - 123 :

- 1: Potential yield;, b: Barley, c: climatic, "" :none, w: Wheat
- 2: Pression type ; c: classical, M: mixed
- 3: Threshold; L : Low, M : Median; H : High

Pour le colza, aucune maladie ne présente une corrélation significative avec le rendement, quel que soit le modèle (Figure 4). On constate cependant que plusieurs insectes ressortent avec un impact significatif, notamment les charançons du bourgeon terminal, et celui des siliques, avec des pertes moyennes de l'ordre de 1q/ha.

Ce résultat confirme bien qu'actuellement les problématiques maladies sur colza sont limitées par rapport aux pertes causées par les ravageurs. De nouveau on constate que l'introduction d'un proxy du rendement atteignable est très importante pour la capacité prédictive de nos modèles (Figure 5). Elle permet d'expliquer à elle seule environ 40 % de la variance du rendement du colza, un pourcentage assez stable quel que soit le proxy. Cependant on constate que cela influence peu la part de la variance expliquée par les bioagresseurs, qui reste entre 15 % et 25 %, sauf pour quelques modèles où aucun bioagresseur n'est sélectionné.

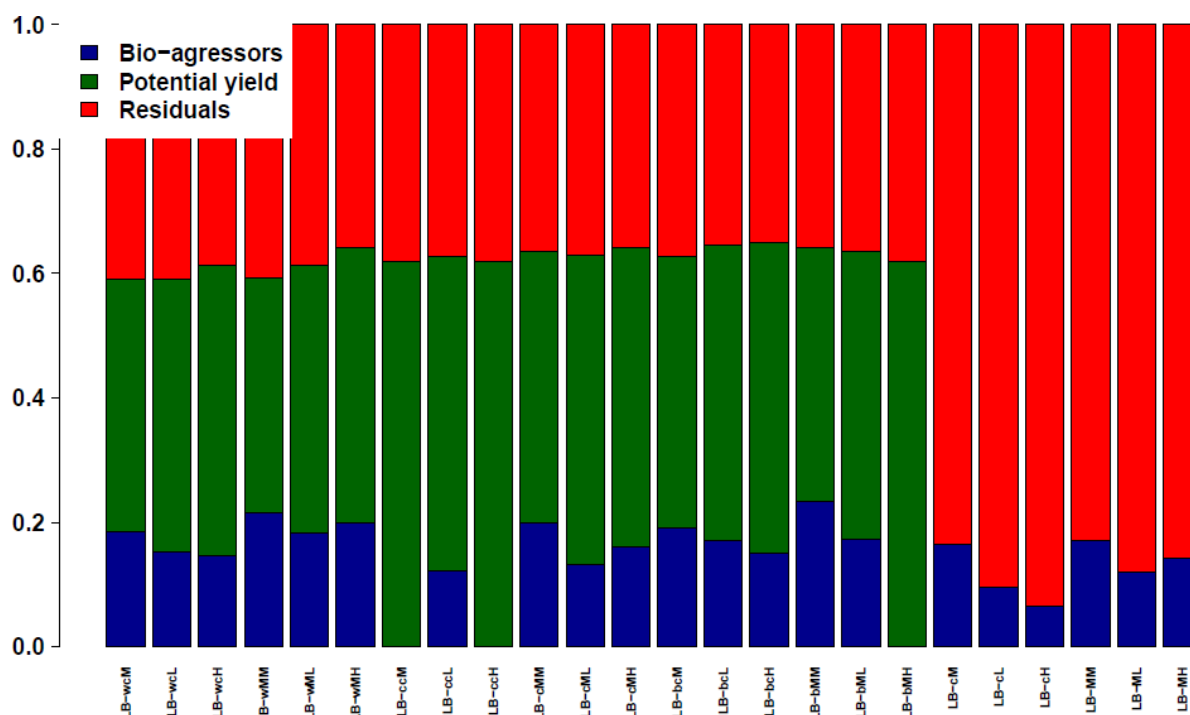


Figure 5 : Part de variance expliquée par les différents paramètres dans chaque modèle (Colza d'hiver). Voir figure 4 pour le détail des noms de modèles.

- Part of variance explained by the different parameters in each model (winter oilseed rape). See Figure 4 for model names.

Parmi les deux maladies étudiées sur l'orge d'hiver, aucun n'est ressortie corrélée avec le rendement. La rhynchosporiose et l'helminthosporiose apparaissent comme bien contrôlées.

DISCUSSION

Notre méthode permet d'identifier des baisses de rendement départemental associées à la pression de bioagresseurs. La septoriose sur blé entraîne des pertes moyennes en France sur la période 2009-2016 de l'ordre de deux quintaux par hectare, correspondant à environ 5% de la variabilité du rendement en blé. Les autres maladies ne présentent pas d'influence significative sur les rendements départementaux.

Les pertes ne sont pas significatives pour les maladies du colza ou de l'orge à l'échelle nationale mais peuvent l'être plus localement. Sur colza seuls des ravageurs présentent un impact significatif à l'échelle nationale ce qui était attendu puisque la problématique maladie sur colza n'a pas été très importante ces dernières années.

D'autres modèles prédictifs de l'impact des bioagresseurs ont été développés, comme WHEATPEST (Willquet et al., 2004), ou CERES-Rice (Pinnschmidt et al., 1995), respectivement sur blé tendre et sur riz. Ce sont des modèles mécanistes agrophysiologiques. Le rendement atteignable de la culture y est d'abord estimé au moyen d'une équation de croissance, avec un pas de temps journalier. Il dépend de variables météorologiques (Température journalière, radiation etc.), de sol et des pratiques agricoles (hors traitement). L'intensité de la pression des bioagresseurs est déterminée à partir d'observations au champ (CERES-rice) ou via modélisation à partir du contexte agricole et climatique (WHEATPEST).

Contrairement à ces modèles, le travail effectué s'appuie exclusivement sur l'analyse statistiques de grands jeux de données en limitant au maximum les a priori sur le fonctionnement du système culture-bioagresseur. En particulier, nous montrons que le rendement d'une autre culture au cycle de végétation semblable peut-être un excellent proxy du rendement et joue le rôle d'un "modèle" biologique remplaçant simplement les modélisations informatiques.

A peine plus complexe, notre modélisation statistique du rendement à partir des données météorologiques et pédologiques fournit aussi d'excellentes approximations du rendement. Si chacun des proxys du rendement atteignable que nous utilisons est contestable individuellement, la large concordance des résultats obtenus malgré la diversité de ces proxys suggère une grande robustesse de nos résultats à la formulation exacte du rendement atteignable.

Par ailleurs, les modèles mécanistes de rendement sont couramment utilisés pour estimer des pertes maximales liées à la présence d'un bioagresseur. La prise en compte des traitements est difficile dans la mesure où l'efficacité des traitements demande un paramétrage supplémentaire du modèle, paramétrage d'autant plus difficile que l'efficacité est sujette à variation dans le temps. Plus généralement la difficulté de paramétrer les modèles mécanistes pour l'ensemble de la diversité des situations présentes en France contraste avec la simplicité de la méthode statistique proposée ici qui doit permettre d'évaluer en continu si une maladie est ou devient dommageable pour les cultures.

Nous avons chiffré le déficit de production lié à la septoriose en système traité à 2 qx/ha, ce qui peut sembler faible au regard des 17qx/ha avancés par les instituts techniques en parcelles non traitées (http://www.fiches.arvalis-infos.fr/fiche_accident/fiches_accidents.php?mode=fa&type_cul=1&type_acc=4&id_acc=46). De même, les autres maladies étudiées ne sont pas ressorties comme ayant un impact significatif sur les rendements. De tels décalages étaient cependant attendus dans la mesure où nous nous intéressons aux pertes effectives compte tenu des traitements habituellement réalisés et non aux pertes potentielles sans traitement. Il est aussi important de souligner que nos résultats sont une moyenne sur une période de 8 ans et à l'échelle départementale alors que les pressions de bioagresseurs varient de manière importante entre parcelles et surtout d'une année sur l'autre.

Notre méthode permet de s'affranchir des différences de métrique entre bioagresseur et de les introduire ensemble dans les modèles, ce qui est important car tous peuvent potentiellement avoir un impact sur les rendements. En revanche le fait qu'un bioagresseur soit significativement corrélé à des pertes de rendement pourrait être dépendant de la métrique utilisée pour quantifier son abondance. En particulier, si d'autres métriques sont mieux corrélées aux dommages à la parcelle que celles les plus couramment employées dans le réseau d'épidémiosurveillance, elles pourraient aussi se révéler significativement corrélées aux variations de rendements départementaux. Globalement les proxys du rendement atteignable utilisés expliquent une plus grande part de la variation du rendement d'une culture que les bioagresseurs, ce qui suggère que les variations de rendement sur blé, colza et orge sur la période 2009-2016 sont davantage liées à la météorologie qu'à l'attaque des bioagresseurs eux-mêmes.

CONCLUSION

Les maladies de l'orge ou du colza n'ont pas été entre 2009 et 2016 des déterminants significatifs du rendement à l'échelle départementale. Un déficit de contrôle semble en revanche avéré pour la septoriose, induisant des pertes de rendement moyennes en France de l'ordre de 2 qx/ha. De manière assez originale, la méthode de calcul utilisée a permis d'évaluer l'impact résiduel des bioagresseurs en situation de contrôle chimique. Elle pourrait être utilisée pour la surveillance en continu à l'échelle nationale des contournements de résistance et plus généralement des déficits de gestions des maladies des grandes cultures.

REMERCIEMENTS

Ce travail a été financé par l'ANR LabEx Basc, projet APISMAL (<https://www6.inra.fr/basc/Recherche/Projets-phares-Phase-2016-2019/API-SMAL>). Nous remercions le comité d'épidémiosurveillance français ainsi que le Centre National de Recherches Météorologiques pour l'accès aux données.

BIBLIOGRAPHIE

Chevalier-Gérard C., Denis J., Meynard J., 1994. Perte de rendement due aux maladies cryptogamiques sur blé tendre d'hiver. Construction et validation d'un modèle de l'effet du système de culture. *Agronomie* 14, 305– 318. <https://doi.org/10.1051/agro:19940504>

Comins H.N., 1977. The management of pesticide resistance. *J. Theor. Biol.* 65, 399–420. [https://doi.org/10.1016/0022-5193\(77\)90206-5](https://doi.org/10.1016/0022-5193(77)90206-5)

Bonaudo T., Burlamaqui Bendahan A., Sabatier R., Ryschawy J., Bellon S., Leger F., Magda D., and Tichit M., 2014. Agroecological principles for the redesign of integrated crop-livestock systems. *European Journal of Agronomy* 57, 43–51.

Delbos C., David O., Minas A., Cerf M., Falgas C., Gagneur C.A., Gilet J.D., Laudinot V., Sigwalt A., Waldmeier E., 2014. Conseil agronomique et réduction des pesticides : quelles ressources pour affronter ce nouveau challenge professionnel ? *Innovations agronomiques*, 34, 367–378.

Duru M., M'Hand F., Therond O., 2014. Un cadre conceptuel pour penser maintenant (et organiser demain) la transition agroécologique de l'agriculture dans les territoires. *Cahier agricoles*, vol 23 N°2.

Fones H., Gurr S., 2015. The impact of Septoria tritici Blotch disease on wheat: An EU perspective. *Fungal genetics and biology*, vol 79., 3–7

Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO), 2015. Yield gap analysis of field crops. Methods and case studies. *FAO Water Reports* 41, Rome.

Jutsum A.R., Heaney S.P., Perrin B.M., Wege P.J., 1998. Pesticide resistance: assessment of risk and the development and implementation of effective management strategies†. *Pestic. Sci.* 54, 435–446. [https://doi.org/10.1002/\(SICI\)1096-9063\(199812\)54:4<435::AID-S844>3.0.CO;2-](https://doi.org/10.1002/(SICI)1096-9063(199812)54:4<435::AID-S844>3.0.CO;2-)

McRoberts N., Franke A.C., Marshall G., Malik R, K., 2003. SURVEY OF PHALARIS MINOR IN THE INDIAN RICE-WHEAT SYSTEM. *Experimental agriculture*, vol 39, 3, 253–257.

Ministère français de l'agriculture, 2011. Méthode de calcul des IFT de référence dans le cadre du réseau de fermes DEPHY.

Padwick G. W., 1956. Losses caused by plant diseases in the colonies. *Phytopathological papers CMI*, N°1, 60pp.

Pinnschmidt H.O., Batchelor W.D., Teng P.S., 1995. Simulation of multiple species pest damage in rice using CERES-rice. *Agric. Syst.* 48, 193–222. [https://doi.org/10.1016/0308-521X\(94\)00012-G](https://doi.org/10.1016/0308-521X(94)00012-G)

R Core Team (2017). R : A language and environment for statistical computing. *R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria*. URL <https://www.R-project.org/>.

Savary S., Teng P.S., Willocquet L., Nutter F.W., 2006. Quantification and Modeling of Crop Losses: A Review of Purposes. *Annu. Rev. Phytopathol.* 44, 89–112. <https://doi.org/10.1146/annu.rev.phyto.44.070505.143342>

Savary S., Ficke A., Aubertot J.-N., 2012. Crop Losses due to diseases and their implications for global food production losses and food security. *Food security*. 4, 519–537.

Willocquet L., Elazegui F.A., Castilla N., Fernandez L., Fischer K.S., Peng S., Teng P.S., Srivastava R.K., Singh H.M., Zhu D., Savary S., 2004. Research Priorities for Rice Pest Management in Tropical Asia: A Simulation Analysis of Yield Losses and Management Efficiencies. *Phytopathology* 94, 672–682. <https://doi.org/10.1094/PHTO.2004.94.7.672>

Willocquet L., Aubertot J.N., Lebard S., Robert C., Lannou C., Mille B., Czembor J., Savary S., 2008. WHEATPEST: a simulation model of yield losses caused by multiple injuries for wheat in Europe. *ENDURE International Conference* 2008.