

**AFPP - 6^e CONFÉRENCE SUR LES MOYENS ALTERNATIFS DE PROTECTION
POUR UNE PRODUCTION INTEGRÉE
LILLE - 21, 22 ET 23 MARS 2017**

**REGARDS CROISÉS SUR L'EFFET DES ESPACES SEMI-NATURELS ET DE
L'ASSEOLEMENT SUR LES BIO-AGRESSEURS DE GRANDES CULTURES**

C. M. BARBU¹, M. CHEN^{2,3}, N. GUERIN¹, D. SIMMONEAU⁴, M. VALENTIN-MORISON¹, C. SAUSSE², I. FELIX³.

¹ INRA UMR211 Agronomie, 78850 Thiverval-Grignon, France. corentin.barbu@inra.fr

² Terres Inovia, Centre de Grignon, avenue Lucien Brétignières, 78850 Thiverval-Grignon, France

³ ARVALIS - Institut du végétal, Domaine expérimental du Chaumoy, 18570 Le Subdray, France

⁴ ARVALIS – Institut du végétal, 91720 Boigneville, France.

RÉSUMÉ

Alors qu'un objectif de réduction d'usage des produits phytosanitaires est posé, le potentiel de leviers paysagers est exploré. Ici nous évaluons sur neuf des principaux bioagresseurs du blé, du colza et du maïs si l'augmentation de la surface cultivée augmente la pression de bioagresseurs et si les espaces semi-naturels (bois, haies, prairies) tendent à protéger les cultures. Pour cela nous avons compilé de manière structurée la littérature scientifique, rassemblé les connaissances d'experts nationaux et analysé des données nationales d'abondance de bioagresseurs (Vigicultures®) en lien avec les données du registre parcellaire graphique et de la BD TOPO® de l'Institut national de l'information géographique et forestière (IGN). A ce stade nos résultats suggèrent que, suivant les bioagresseurs, les éléments semi-naturels (bois, haies, prairies) peuvent avoir un effet protecteur, défavorable ou neutre. Par contre, l'augmentation de la présence d'une culture semble augmenter la pression de ses bioagresseurs.

Mots-clés : bioagresseurs, grandes cultures, paysage, espaces semi-naturels.

CRITICAL VIEWS ON THE EFFECT OF SEMI-NATURAL SPACES AND CULTIVATED AREAS ON BIO-AGGRESSORS OF GRAIN CROPS

ABSTRACT

As an objective of reducing the use of plant protection products is laid, the potential for landscape levers is explored. Here, we evaluate for nine of the main bio-aggressors of wheat, rapeseed and maize if the increase in cultivated area increases the pressure of bio-aggressors and if the semi-natural areas (wood, hedges, grasslands) tend to protect cultures. For this purpose, we compiled in a structured way the scientific literature, gathered the knowledge of national experts and analysed national data of abundance of bio-aggressors (Vigicultures®) in connection with data from the Common Agricultural Policy and the BD TOPO® of the Institut Géographique National. At this stage our results suggest that, depending on the bio-aggressors, semi-natural elements (wood, hedges and meadows) may have a protective, unfavourable or neutral effect. On the other hand, increasing the presence of a crop seems to increase the pressure from its bio-aggressors.

Keywords: pests, diseases, field crops, landscape, semi-natural areas.

INTRODUCTION

Face à la demande sociétale pour une réduction de l'utilisation de produits phytosanitaires, il est pertinent d'évaluer comment favoriser le contrôle naturel des bioagresseurs. En raison de leur capacité de dispersion ces organismes ne sont pas inféodés à la parcelle et l'analyse à l'échelle du paysage est indispensable. A cette échelle, il est souvent considéré d'une part que l'augmentation de la surface d'une culture favorise les ravageurs de cette culture et d'autre part que les espaces semi-naturels pourvoyeurs d'ennemis naturels des ravageurs limitent leur prolifération (Bianchi et al., 2006 ; Chaplin-Kramer et al., 2011 ; Tscharntke et al., 2016). Inversement les espaces semi-naturels peuvent être considérés comme des relais pour les bioagresseurs eux-mêmes augmentant la pression de bioagresseurs sur les cultures (Tscharntke et al., 2016). Pour évaluer la généralité de ces principes à l'échelle de la France, nous étudions 9 des principaux bioagresseurs des grandes cultures : Pyrale sur maïs (*Ostrinia nubilalis*) ; sclerotinia (*Sclerotinia sclerotiorum*), phoma (*Leptosphaeria maculans*), grosse altise (*Psylliodes chrysocephala*) et méligethè sur colza (*Meligethes aeneus*) ; septoriose (*Septoria tritici*), rouille jaune (*Puccinia striiformis*), cécidomyie orange (*Sitodiplosis mosellana*) et pucerons des épis sur blé (*Sitobion avenae*).

Nous avons développé trois approches pour faire le bilan des liens entre ces éléments paysagers et l'abondance de ces bioagresseurs : l'analyse structurée de la littérature existante, l'élicitation qualitative et quantitative d'experts nationaux (INRA, instituts techniques, chambres d'agriculture et Ministère de l'Agriculture) et l'analyse statistique de données nationales d'abondance sur ces bioagresseurs en lien avec les éléments paysagers avoisinants (surface de la culture touchée, de bois, de prairies, de haies, de vergers et de landes) à quatre échelles : 200 m, 1 km, 5 km et 10 km.

MATÉRIEL ET MÉTHODE

ELICITATION DE CONNAISSANCE EXPERTE ET BIBLIOGRAPHIQUE

CompEl : Questionnaire d'élicitation comparative

L'élicitation, ou évaluation quantitative à dire d'experts, a été développée pour quantifier des risques pour lesquels des expérimentations sont difficiles ou impossibles, tel que les risques d'accidents nucléaires. Ici nous reprenons une technique d'élicitation classique : la roulette (Johnson et al., 2010), afin d'obtenir une probabilité pour chaque valeur du coefficient de corrélation entre prédicteur et abondance de bio-agresseur. Nous y ajoutons une dimension qualitative (l'expert doit indiquer les mécanismes justifiant son évaluation, Figure 1) et comparative (les évaluations entre échelles et entre éléments paysagers sont visuellement comparées afin d'ajuster la cohérence des réponses, Figure 2). Cet outil interactif peut être utilisé dans le cadre d'entretiens à distance car il autorise la visualisation simultanée sur plusieurs postes (<https://ecosys.versailles-grignon.inra.fr/SpatialAgronomy/compel>).

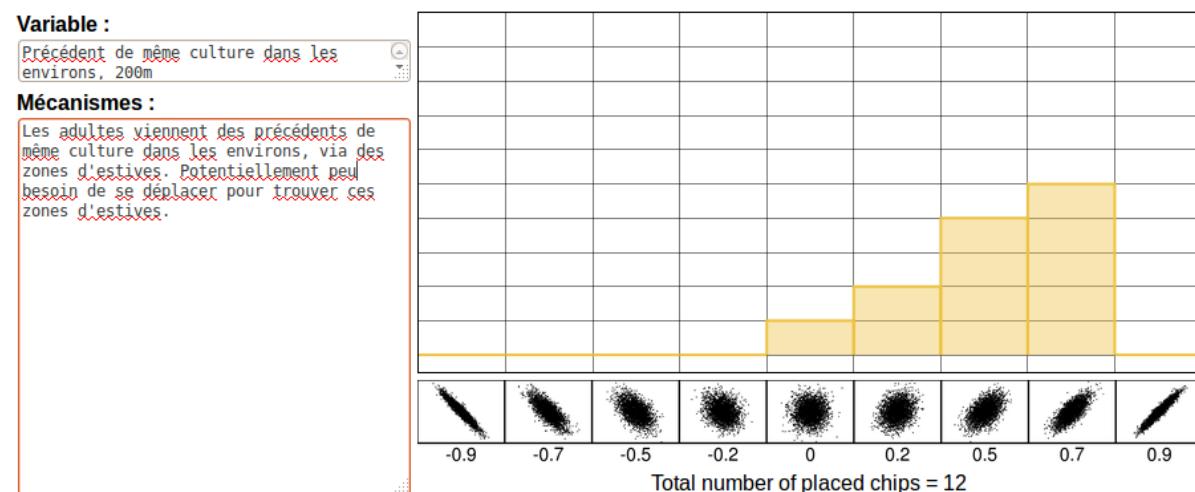


Figure 1 : Exemple de réponse qualitative et quantitative, effet du précédent colza dans les environs à 200m sur l'abondance d'altises -- Example of a qualitative and quantitative answer: the impact of previous rapeseed within 200m on the abundance of flea beetles.

Etude bibliographique

Afin d'obtenir une vision générale de la bibliographie pour chaque bioagresseur étudié nous avons réalisé une étude bibliographique structurée. Pour cela nous avons défini d'une part des requêtes standardisées, par exemple « nom commun anglais du bioagresseur landscape » ou « nom latin du

bioagresseur natural regulation » et d'autre part des éléments paysagers pouvant avoir un lien avec l'abondance de bioagresseurs. Deux stagiaires de M2 ont ensuite, l'un pour les maladies et l'autre pour les bioagresseurs, appliqué ces requêtes auprès de Google Scholar® et rempli notre questionnaire qualitatif et quantitatif (voir encadré) en argumentant à l'aide de citations la nature et l'intensité des liens entre pratiques ou éléments paysagers et abondance de bioagresseurs.

Questionnaire

Question : Quel effet de ... attendez-vous sur l'abondance du bio-agresseur ?

Pensez au cycle de vie, la dispersion, l'alimentation mais aussi aux prédateurs, généralistes ou spécialistes.

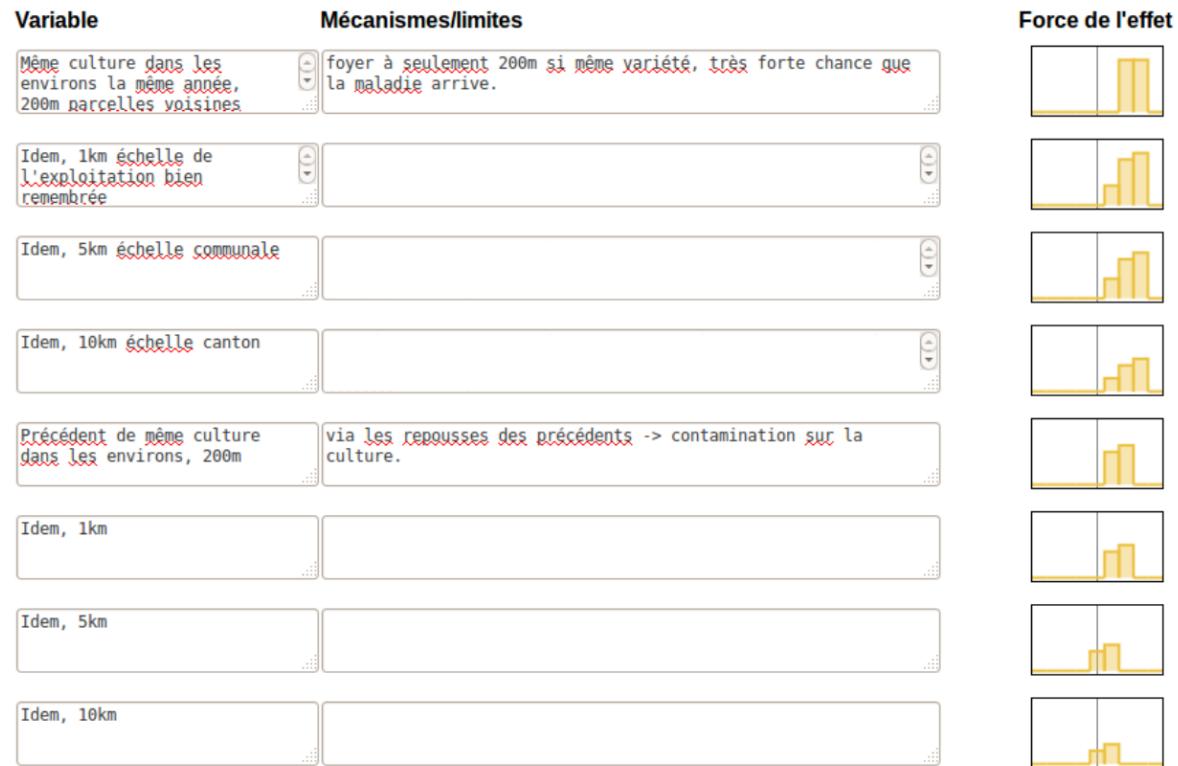


Figure 2 : Exemple de présentation comparative des effets de surfaces de même culture à différentes échelles aux années N et N-1 pour la rouille jaune sur blé – Example of comparative elicitation for the impact of cultivated surfaces at year N and N-1 on yellow rust

Elicitation des connaissances d'experts

Grâce au partenariat entre l'INRA, Arvalis Institut du végétal et Terres Inovia, 2 à 5 experts nationaux par bioagresseur ont participé à l'évaluation. Ces experts des instituts partenaires, de chambres d'agriculture régionales ou du Ministère de l'Agriculture ont rempli les questionnaires CompEl dans le cadre d'entretiens d'environ deux heures par bioagresseur (parfois à distance). Les questions posées aux différentes échelles cherchaient à identifier le niveau de corrélation entre l'abondance du bioagresseur et les pratiques (délai de retour de la culture, assolement, travail du sol, densité de semis...) ou éléments paysagers (haies, bois, prairies, ...). Pour chaque question les experts étaient invités premièrement à décrire les liens existants entre pratiques ou éléments paysagers et abondance du bioagresseur. Dans un deuxième temps ils étaient invités à décrire la distribution de probabilité du coefficient de corrélation de ces deux variables. Dans un troisième temps le facilitateur indiquait la probabilité élicitée que la corrélation soit supérieure à 0 en invitant l'expert à corriger la distribution si besoin. Enfin l'expert était invité à comparer la distribution à la distribution précédente et aux deux distributions les plus extrêmes précédemment élicitées, là encore suggérant de corriger pour assurer la cohérence des courbes.

ANALYSE STATISTIQUE

Données utilisées

Pour évaluer les corrélations statistiques entre abondances de bioagresseurs et éléments paysagers, nous avons mis en relation trois bases de données à l'échelle de la France métropolitaine. La base Vigicultures® correspond à des observations hebdomadaires de bioagresseurs dans des parcelles, réalisées à partir de 2009 pour informer le bulletin de santé du végétal. La BD TOPO®, couche végétation, de l'Institut national de l'information géographique et forestière (IGN) nous a permis de prendre en compte forêts, haies, landes et vergers. Le registre parcellaire graphique (RPG), issu des déclarations dans le cadre de la politique agricole commune nous a permis de caractériser l'assoulement. Le formatage commun de ces données et leur analyse conjointe représentait un challenge informatique et a nécessité la création d'outils informatiques spécifiques (cf. « outils informatiques » ci-après).

Méthode statistique

Nous avons étudié les liens entre les aires des éléments paysagers et le dépassement de seuils d'abondances au cours de la campagne à l'aide de glm ajustés par LASSO (Tibshirani, 1996). Les modèles linéaires généralisés (glm) sont très utilisés pour identifier statistiquement la capacité explicative de multiples variables. Ils considèrent que la variable observée y est une variable aléatoire suivant une distribution de probabilité D (ou fonction de lien) dont le paramètre, appelé prédicteur, est une moyenne pondérée des variables (x_1 à x_n):

$$y \sim D(\alpha + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \cdots + \beta_n x_n)$$

Ici les observations étant ramenées à des comptages de dépassement de seuils par campagne nous avons utilisé une fonction de lien (D) de type Poisson. De multiples outils peuvent être utilisés pour identifier les paramètres α et β_i de ces modèles. Cependant, une difficulté fréquemment rencontrée sur l'analyse de jeux de données complexes est la sélection des variables pertinentes parmi celles disponibles. La méthode LASSO sélectionne les variables les plus pertinentes en termes de prédiction et ajuste le modèle glm correspondant. Si le β_i estimé d'une variable x_i est nul, cela signifie que x_i n'a pas de valeur prédictive pour y .

La sélection des variables dépend d'un paramètre de régularisation λ qui est identifié en ajustant le modèle sur une fraction du jeu de données puis en mesurant la qualité de la prédiction sur le reste du jeu de données : c'est la validation croisée. Ici nous utilisons une valeur de λ limitant fortement le risque de signaler indûment une corrélation : dans le package glmnet de R nous utilisons « lambda.1se » (Friedman et al. 2010). Ce choix correspond, au lieu de retenir le λ qui minimise l'erreur à la validation croisée, à diminuer le λ (retirer des variables) jusqu'à ce que la dégradation de la prédiction soit égale à l'écart-type de l'erreur du modèle pour le λ minimisant l'erreur de prédiction. Cela évite de retenir des variables qui n'améliorent que marginalement la prédiction.

Calcul du coefficient de corrélation partiel

Pour permettre la comparaison avec les coefficients de corrélation élaborés auprès des experts et à partir de la bibliographie les tailles d'effets sont ramenées à des coefficients de corrélation partiels (r_v) pour chaque variable v . Les coefficients de corrélation partiels sont calculés en prenant la racine du coefficient de détermination partiel R_v^2 multiplié par le signe du coefficient de régression de la variable (c_v) dans le modèle sélectionné par la procédure LASSO :

$$r_v = \text{sign}(c_v) \sqrt{R_v^2}$$

Le coefficient de détermination partiel R_v^2 est lui estimé à partir de la déviance du modèle complet sélectionné par la procédure LASSO (D_c) et de la déviance du modèle LASSO sans la variable v considérée (D_{nv}).

$$R_v^2 = 1 - \frac{D_c}{D_{nv}}$$

La déviance du modèle réduit D_{nv} correspond à la déviance du modèle sélectionné pour la même valeur de λ que le modèle complet mais en ayant retiré la variable considérée du jeu de variables pouvant être sélectionnées.

Variables considérées

Les variables de sorties pour les bioagresseurs étaient des comptages de dépassement de seuils d'abondance au cours de la campagne (Tableau 1). Par soucis de simplicité et d'homogénéité de

calcul entre les différents bioagresseurs nous n'avons utilisé ici comme variables explicatives que les surfaces des éléments paysagers. Autour de chaque parcelle de suivi des bioagresseurs nous avons mesuré les aires de chaque élément paysager dans des rayons de 200m, 1km, 5km et 10km. Toutes les variables explicatives sont passées au log : $variable\ transformée = \log(v+1)$.

Enfin, pour limiter les confusions entre facteurs climatiques et éléments paysagers, nous avons distingué pour la France métropolitaine onze régions « agro-climatiques », intégrées à la régression comme facteurs qualitatifs.

Tableau 1 : Seuils d'abondance retenus pour l'analyse statistique spatiale (LASSO) – Abundance thresholds for spatial statistical analysis (LASSO)

Culture	Bioagresseur	Métrique d'abondance	Seuil
maïs	pyrale (<i>Ostrinia nubilalis</i>)	nombre de pontes pour 100 pieds	1
colza	sclérotinia (<i>Sclerotinia sclerotiorum</i>)	plantes avec présence sur hampes principales et secondaires	10 %
	phoma (<i>Leptosphaeria maculans</i>)	plantes avec macule	1%
	grosse altise (<i>Psylliodes chrysocephala</i>)	plantes avec morsure	1%
	méligrèthe du colza (<i>Meligethes aeneus</i>)	insectes en moyenne par plante	2
blé	septoriose (<i>Septoria tritici</i>)	à partir du stade Z32, nombre de plantes sur 10 ayant une F2 touchée	1
	rouille jaune (<i>Puccinia striiformis</i>)	à partir du stade Z30 nombre de plantes sur 20 dont les feuilles F3 sont touchées	1
	cécidomyie orange (<i>Sitodiplosis mosellana</i>) :	présence d'un adulte par épis en moyenne	1
	pucerons des épis (<i>Sitobion avenae</i>)	pourcentage de pieds présentant des pucerons	1%

Outils informatiques utilisés et réalisés

R est un langage informatique et un logiciel de statistiques libre et gratuit très largement utilisé dans le monde de la recherche. Il tire son succès de la facilité de créer des modules ou packages qui doivent comporter le code informatique nécessaire aux fonctionnalités mais aussi une documentation et des exemples d'utilisation. Toutes les analyses de données ont été réalisées dans R et plusieurs packages ont été réalisés : packages de données et package de calcul permettant de manipuler les données géographiques de type vectoriel pour extraire des mesures paysagères. Ces outils permettent d'extraire aires, périmètres et distance minimale aux éléments décrits dans la couche végétation de la BDTOPO® mais aussi aux différents groupes cultures décrits dans le RPG entre 2006 et 2014. Pour des rayons de calculs emboités dont le plus grand est de 10 km, ce processus prend quelques heures pour 10000 points sur un ordinateur de bureau. Le package de calcul est disponible à l'adresse <https://bitbucket.org/cmbce/polygonlandscapemetrics>. Les packages de données (données Vigiculture®, Registre Parcellaire Graphique et BDTOPO® de l'IGN) ne sont pas disponibles pour le grand public mais les personnes ayant acquis les droits pour accéder à ces données peuvent nous contacter pour bénéficier du travail réalisé. Un package R facilitant l'import et l'analyse des données de questionnaire CompEl a aussi été réalisé et est disponible sur demande.

RÉSULTATS

ELICITATION D'EXPERTS ET ÉTUDE BIBLIOGRAPHIE

La médiane des effets attendus par les experts pour les éléments semi-naturels peut être négative ou positive suivant les bioagresseurs et les espaces semi-naturels. Par contre, il est attendu par les experts que la surface de la culture sensible (blé, maïs ou colza suivant le bioagresseur), notamment l'année précédente, augmente l'abondance de ravageurs : aucun effet médian négatif n'est rapporté.

La comparaison avec les résultats de questionnaires à l'échelle parcellaire (non présentés ici) montre que les effets attendus de pratiques telles que l'utilisation de produits phytosanitaires ou autres

pratiques de contrôle sont plus élevés que les effets attendus des éléments paysagers.

Qualitativement et quantitativement, les experts partagent des opinions assez différentes, et parfois divergentes sur l'impact des éléments paysagers sur le paysage. Pour regrouper les opinions d'experts nous avons sommé les distributions de probabilité issues des interviews. Les intervalles de confiance qui en résultent incluent généralement 0 et parfois comprennent à la fois des valeurs positives et négatives.

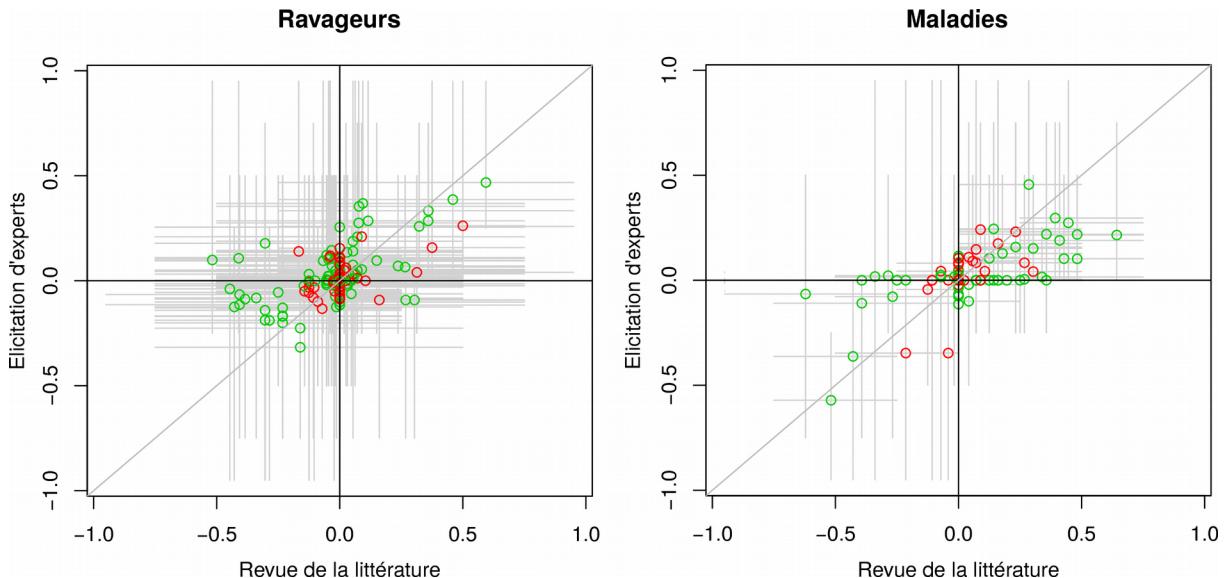


Figure 3 : Cohérence des estimations des corrélations entre éléments paysagers et abondance de bioagresseurs entre revue structurée de la bibliographie et interrogations d'experts – Consistency of estimations from structured bibliography review and experts elicitation for the correlation between landscape elements and pest or disease abundance

Points verts : échelles 200 et 1000m. Points rouges : 5000 et 10000 m. Traits gris: intervalles de confiance à 95%.

La corrélation entre valeur moyenne élicitée auprès des experts et valeur estimée d'après la bibliographie est nette (Figure 3), la pente est de 0.75 avec un intervalle de confiance à 95 % de 0.58 à 0.92 pour les ravageurs et de 1.03 avec un intervalle de confiance à 95% de 0.8 à 1.25 pour les maladies, donc dans les deux cas la corrélation est non seulement significative mais aussi proche de 1 suggérant que l'échelle subjective de notation est similaire.

STATISTIQUES

La détection d'effets des éléments paysagers représentait un vrai défi. Au-delà des développements informatiques importants, des incohérences entre géoréférencement dans Vigicultures® et dans le RPG ont été observées. De plus, des déterminants majeurs de l'abondance des bioagresseurs tels que les produits phytosanitaires ou la météorologie n'ont pas été pris en compte. Enfin nous avons utilisé une sélection de variables très discriminante. Malgré cela, quatre des cinq ravageurs et deux des quatre maladies présentent des coefficients de corrélation pertinents pour la prédiction pour au moins l'un des éléments spatiaux (Figure 4). On notera que la faible présence des pucerons des épis pendant les années étudiées (2009-2014) pourrait expliquer l'absence d'effets paysagers détectés. Pour les maladies, l'absence d'éléments paysagers détectés pour le sclerotinia n'est pas étonnante : c'est une maladie notoirement inféodée à la parcelle que nous avions inclue comme « témoin négatif » dans nos analyses. L'absence d'éléments paysagers significativement corrélates à l'abondance de rouille jaune est plus surprenante étant donné la forte dimension spatiale de cette maladie mais pourrait aussi s'expliquer par l'aspect récent de son retour en France, à moins que la transmission ne se fasse aussi à des échelles bien plus grandes, continentales..

Les tailles d'effets peuvent paraître faibles mais les limitations notées ci-dessus peuvent expliquer la faiblesse des effets observés. Par ailleurs, les coefficients de corrélation des éléments paysagers et des régions agro-climatiques peuvent être du même ordre de grandeur. Par exemple, pour l'altise, le coefficient de corrélation associé aux haies (protecteur) correspond à plus de la moitié de l'effet régional le plus fort et l'effet protecteur des prairies pour le mélègue est plus important que tous les effets régionaux. L'insertion à l'avenir d'autres éléments dans la régression permettrait de positionner les effets paysagers par rapport à d'autres déterminants (pratiques ou météorologie).

STATISTIQUES VERSUS EXPERTS ET BIBLIOGRAPHIE

Les coefficients de corrélation sont faiblement corrélés aux moyennes des estimations par les experts (test des rangs de Wilcoxon p-value=0.007) mais non significativement corrélés à l'estimation par la bibliographie. Par ailleurs, la sélection automatique d'échelle pertinente par la sélection LASSO parmi les quatre échelles favorise presque systématiquement des échelles plus grandes que celles identifiées par les experts (Figure 4). Cependant, les seuls effets pour lesquels l'intervalle de confiance donné par les experts n'inclut pas 0 sont bien retrouvés par l'analyse : bois favorisant les méligrèthes et colza N-1 favorisant l'altise. Enfin, la corrélation très élevée entre cultures présentes à l'année N et N-1 (non présenté ici) suggère que la sélection de l'une plutôt que l'autre de ces variables est sujette à caution. C'est sans doute le phoma qui donne les résultats les plus surprenants avec à la fois une corrélation négative avec les haies à 1000 m et une corrélation négative avec les prairies à 10000m. On notera cependant que les effets à une telle échelle sont susceptibles de refléter des effets confondants liés aux orientations générales de petites régions agricoles.

Espaces semi-naturels :

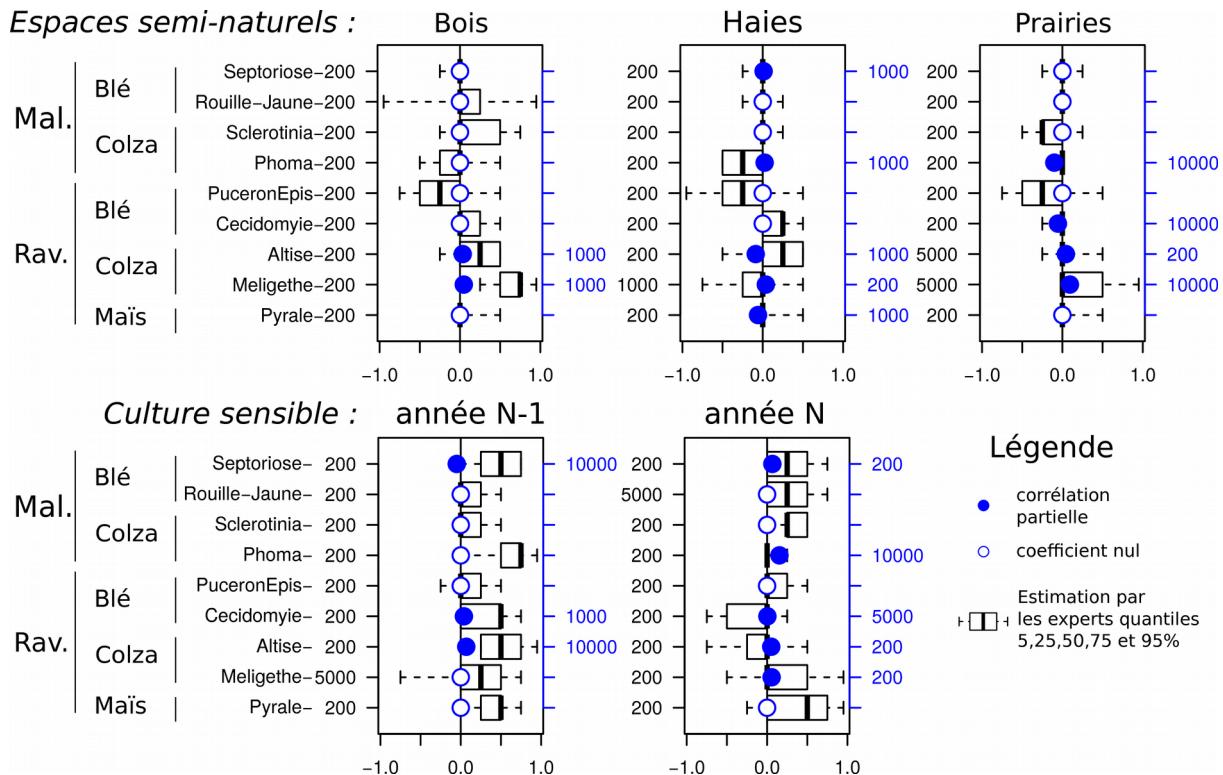


Figure 4 : Corrélations élicitées auprès des experts et coefficients de corrélation partielle (LASSO)
-- Correlations elicited from experts and partial correlation coefficients (LASSO)

Axes verticaux: distance (m) ayant le plus d'effet, à gauche d'après les experts et à droite d'après l'analyse LASSO.

En ce qui concerne le test général de nos deux hypothèses agro-écologiques, les résultats sont largement concordants entre les estimations par les experts et les statistiques. Premièrement, experts comme statistiques suggèrent que l'augmentation de cultures sensibles dans le paysage tend à augmenter la pression de bioagresseurs. Le seul contre-exemple est la septoriose pour lequel la corrélation négative avec la surface de blé à l'année N-1 est d'une part contrée par une corrélation positive avec la surface de blé à l'année N et d'autre part est présente à une très grande échelle (10 km) peut-être plus sujette aux effets confondants. Deuxièmement, experts comme statistiques suggèrent une grande diversité des effets de la présence d'éléments semi-naturels suivant les bioagresseurs et les éléments semi-naturels.

DISCUSSION

RÉSUMÉ DES RÉSULTATS

Lorsque l'on regarde les bioagresseurs individuellement, la correspondance entre les approches n'est pas évidente, d'autant que l'incertitude des experts ou des estimations à partir de la bibliographie quant aux effets du paysage est très importante. Cependant, l'ensemble des résultats suggère bien un effet plutôt protecteur de la faible surface cultivée pour une culture donnée ; en revanche, les espaces semi-naturels ne semblent pas apporter de protection systématique contre les bioagresseurs et

peuvent dans plusieurs cas représenter des facteurs de risque.

RELATIONS À LA BIBLIOGRAPHIE EXISTANTE

Notre méthodologie d'élicitation est basée sur la quantification par roulette largement utilisée et reconnue (Johnson et al., 2010) et qui avait déjà été implémentée en version web pour permettre une élicitation, y compris à distance (Morris et al., 2014). Reprenant l'idée, nous y ajoutons la préparation de l'élicitation par l'explicitation des liens entre variable d'abondance des bioagresseurs et paramètre explicatif et la comparaison des corrélations élicitées pour différents paramètres. La méthode d'analyse structurée de la bibliographie utilisée s'appuyait moins sur des méthodes existantes dans la mesure où ce type de quantification à partir de la littérature implique habituellement des méta-analyses (Sutton et al., 2000). Cependant, la méthode de revue structurée, basée sur le questionnaire CompEl que nous avons développé, permet par rapport à la méta-analyse de réaliser extrêmement rapidement une quantification argumentée par la réflexion à partir de résultats disparates présents dans la bibliographie. La cohérence des résultats entre bibliographie et élicitation d'experts semble valider à la fois la méthode d'élicitation quantitative et la méthode de revue structurée de la littérature.

Notre approche de statistiques sur de grands jeux de données s'appuie sur la méthodologie de régression linéaire LASSO bien établie (Tibshirani 1996, Friedman et al. 2010) et déjà utilisée par le passé pour l'analyse de métriques paysagères (voir par exemple Gimona et al. 2009). En revanche, les outils existants pour le calcul de métriques paysagères, basés sur des formats "raster", tels que Fragstat (McGarigal et al., 2012) n'étaient pas adaptés. Ils permettent le calcul de métriques paysagères pour un grand nombre de points très densément distribués mais sur des étendues restreintes. L'outil de calcul de métriques paysagères, basé sur des formats "vectoriel", que nous avons développé permet lui le calcul pour des points peu densément distribués sur de grandes très grandes étendues et avec une précision arbitraire. Ces derniers points étaient cruciaux étant donné l'étendue nationale des points étudiés et la finesse des éléments paysagers considérés (notamment les haies).

La combinaison d'approches d'élicitation et d'analyse statistiques dans une perspectives Bayésienne est commune en écologie (Choy et al., 2009) et cette approche pourrait à l'avenir permettre de réaliser à partir des données collectées des cartes de risques liés aux éléments paysagers. Cependant, nous n'avons pas connaissance d'autres travaux combinant trois approches quantitatives différentes, de plus appliquées à un aussi grand nombre d'organismes pour répondre à des questions écologiques appliquées telles que celles que nous avons abordées. Sur les questions posées néanmoins, de nombreux articles expérimentaux, théoriques ou de revues ont été publiés. L'effet de la diversité des paysages sur les auxiliaires des cultures a ainsi bien été mis en évidence, bien qu'un déficit de travaux évaluant l'effet sur les bioagresseurs eux-mêmes ait aussi été relevé (Bianchi et al. 2006 ; Chaplin-Kramer et al., 2011). Ce déficit pourrait d'ailleurs refléter un biais de publication : les "absence de résultats" sont plus rarement publiées (Dwan et al., 2008). La rareté des publications liant éléments semi-naturels et régulation des bioagresseurs suggère ainsi l'absence de cette régulation. Il a d'ailleurs été reconnu récemment par un collectif de chercheurs en écologie que les habitats naturels pouvaient, pour plusieurs raisons, ne pas apporter la régulation espérée (Tscharntke et al., 2016).

Ces considérations jointes à nos résultats suggèrent qu'au delà des spécificités propres à chaque bioagresseur, les abondances d'auxiliaires ne sont pas tant limitées par la présence d'habitats semi-naturels que par la présence de bioagresseurs dont ils se nourrissent ou dont ils dépendent pour la reproduction. Selon cette interprétation, les espaces semi-naturels peuvent favoriser à la fois bioagresseurs et auxiliaires sans que l'évolution de la pression de bioagresseurs résultante de l'équilibre entre les deux soit prévisible. Cet équilibre pourrait cependant être modifié afin de favoriser les auxiliaires par un choix judicieux de structures telles que des bandes fleuries (Haenke et al. 2009 ; Pywell et al., 2015) ou la modification des pratiques (Hanson et al., 2015).

L'influence de la richesse spécifique cultivée dans le paysage a été comparativement peu étudiée, les surfaces agricoles étant généralement considérées comme hostiles par les études citées précédemment. Pourtant, l'effet de l'augmentation des surfaces a été bien démontré chez le méligrète du colza, espèce modèle pour les études paysagères en agrosystèmes. Ses traits d'histoire de vie sont ainsi rapidement modifiés pour augmenter sa capacité de reproduction lorsque les surfaces en colza augmentent dans le paysage (Hokkanen, 2000). Les traitements sur colza, lié au méligrète et à d'autres ravageurs, tendent d'ailleurs à augmenter avec les surfaces cultivées de colza dans le paysage (Schott et al., 2010). Nos travaux confirment de manière systématique et multi-agresseur ces observations. Il semble ainsi que l'augmentation de la surface cultivée, qui représente une explosion de la ressource pour les bioagresseurs, permette un accroissement de la capacité d'exploitation de la ressource entraînant à son tour une augmentation de la pression de bioagresseurs.

Il pourrait être avancé que les ennemis naturels voient aussi leurs ressources augmenter avec la multiplication des bioagresseurs et qu'une régulation à terme pourrait être attendue. La tendance à l'augmentation de la pression avec la surface suggère cependant une dissymétrie dans l'augmentation des ressources pour les bio-agresseurs et pour leurs ennemis naturels qu'il faudrait explorer.

LIMITATIONS

Le nombre d'experts élicités était limité (entre 2 et 4) et de fait les corrélations entre experts pour un même couple bioagresseur/élément paysager sont faibles ou nulles (non-montré ici). Cependant, les corrélations entre experts d'un côté et analyse bibliographique de l'autre suggèrent qu'une information significative a été obtenue. De futurs travaux pourraient tenter d'élargir le cercle des experts à des acteurs de terrains : agriculteurs, conseillers de coopératives, conseillers de chambres d'agricultures départementales. De futurs développements pourraient aussi tirer partie des observations qualitatives collectées lors de l'élicitation, cela permettrait notamment d'identifier si des divergences entre valeurs élicitées correspondent à des mécanismes biologiques mentionnés différents ou si elles s'expliquent plutôt par des différences de poids accordé par les différents experts aux mécanismes que tous ont identifiés.

Les résultats obtenus avec l'analyse statistique des métriques d'abondance ouvrent une voie prometteuse d'analyse et de nombreuses améliorations peuvent être apportées. D'une part les données utilisées sont imparfaites. Par exemple, il a été rapporté que les données du RPG peuvent présenter des îlots dupliqués, un nettoyage supplémentaire pourrait être réalisé pour éviter cette source de "bruit statistique". En ce qui concerne les bioagresseurs, l'analyse pourraient être élargie à d'autres ravageurs majeurs tels que le charançon du bourgeon terminal sur colza. Différents seuils pourraient aussi être testés pour identifier si les facteurs favorisant de faibles abondances favorisent aussi de fortes abondances.

Pour confirmer et préciser les effets observés et envisager la planification de paysages suppresseurs, il serait intéressant d'intégrer dans les modèles statistiques, des paramètres supplémentaires tels que la pression de produits phytosanitaires. L'effet protecteur des éléments semi-naturels pourrait en effet être limité par la présence de produits phytosanitaires éliminant les populations d'auxiliaires (Tscharntke et al., 2016). Des variables paysagères différentes pourraient aussi être utilisées, par exemple, les linéaires de lisières de bois pourraient être plus pertinents que les aires pour certains bioagresseurs. La surface cultivée d'une culture pourrait aussi être liée indirectement au temps de retour des cultures dans les parcelles. Dans ce cas, la corrélation entre surface cultivée et présence de bioagresseurs pourrait être au moins en partie expliquée par un effet parcelle et non un effet paysage. Nos futurs travaux tenteront de faire la part des choses entre ces deux dimensions de l'espacement des cultures en intégrant dans la régression le délai de retour de la culture.

CONCLUSION

Sur la base d'avancées méthodologiques significatives bien qu'encore imparfaites, nos résultats suggèrent que suivant les bioagresseurs les éléments semi-naturels (bois, haies, prairies) peuvent avoir un effet protecteur, défavorable ou neutre. Par contre, une plus grande diversité des cultures dans le paysage tendrait à limiter la pression de bioagresseurs. La prise en compte de l'utilisation de produits phytosanitaires dans ces modèles permettrait d'une part d'améliorer l'estimation des effets paysagers et d'autre part de tester un troisième principe de l'agro-écologie : la prise de relais par les espaces semi-naturels pour la protection des cultures lorsque le parapluie phytosanitaire est replié.

REMERCIEMENTS

Nous remercions les organismes qui ont financé les stages de master qui ont apporté leur soutien à cette étude, le GIS GCHP2E GC et Arvalis Institut du Végétal ainsi que les chambres régionales d'agriculture et au ministère de l'agriculture qui ont participé via leurs experts à l'approche d'élicitation.

BIBLIOGRAPHIE

- Bianchi, F. J. J. A., Booij, C. J. H., & Tscharntke, T. (2006). Sustainable pest regulation in agricultural landscapes: a review on landscape composition, biodiversity and natural pest control. *Proceedings of the Royal Society of London B: Biological Sciences*, 273(1595), 1715-1727.
- Choy, S. L., O'Leary, R., & Mengersen, K. (2009). Elicitation by design in ecology: using expert opinion to inform priors for Bayesian statistical models. *Ecology*, 90(1), 265-277
- Chaplin-Kramer, Rebecca, Megan E O'Rourke, Eleanor J Blitzer, et Claire Kremen. 2011. « A Meta-analysis of Crop Pest and Natural Enemy Response to Landscape Complexity ». *Ecology Letters* 14 (9): 922-32. doi:10.1111/j.1461-0248.2011.01642.x.
- Johnson, S. R., Tomlinson, G. A., Hawker, G. A., Granton, J. T., Grosbein, H. A., & Feldman, B. M.

(2010). A valid and reliable belief elicitation method for Bayesian priors. *Journal of clinical epidemiology*, 63(4), 370-383.

Morris, D. E., Oakley, J. E., & Crowe, J. A. (2014). A web-based tool for eliciting probability distributions from experts. *Environmental Modelling & Software*, 52, 1-4.

Dwan, K., Altman, D. G., Arnaiz, J. A., Bloom, J., Chan, A. W., Cronin, E., ... & Ghersi, D. (2008). Systematic review of the empirical evidence of study publication bias and outcome reporting bias. *PLoS one*, 3(8), e3081.

Gimona, A., Messager, P., & Occhi, M. (2009). CORINE-based landscape indices weakly correlate with plant species richness in a northern European landscape transect. *Landscape Ecology*, 24(1), 53-64.

Haenke, S., Scheid, B., Schaefer, M., Tscharntke, T., & Thies, C. (2009). Increasing syrphid fly diversity and density in sown flower strips within simple vs. complex landscapes. *Journal of Applied Ecology*, 46(5), 1106-1114.

Hanson, H. I., Smith, H. G., & Hedlund, K. (2015). Agricultural management reduces emergence of pollen beetle parasitoids. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 205, 9-14.

Hokkanen, H. M. (2000). The making of a pest: recruitment of *Meligethes aeneus* onto oilseed Brassicas. *Entomologia experimentalis et applicata*, 95(2), 141-149.

Friedman, J., Hastie, T., & Tibshirani, R. (2010). Regularization paths for generalized linear models via coordinate descent. *Journal of statistical software*, 33(1), 1.

McGarigal, K., SA Cushman, and E Ene. 2012. FRAGSTATS v4: Spatial Pattern Analysis Program for Categorical and Continuous Maps. Computer software program produced by the authors at the University of Massachusetts, Amherst. Available at the following web site: <http://www.umass.edu/landeco/research/fragstats/fragstats.html>

Pywell, R. F., Heard, M. S., Woodcock, B. A., Hinsley, S., Riddings, L., Nowakowski, M., & Bullock, J. M. (2015, October). Wildlife-friendly farming increases crop yield: evidence for ecological intensification. In *Proc. R. Soc. B* (Vol. 282, No. 1816, p. 20151740). The Royal Society.

Schott, C., Mignolet, C., & Meynard, J. M. (2010). Les oléoprotéagineux dans les systèmes de culture: évolution des assolements et des successions culturales depuis les années 1970 dans le bassin de la Seine. *Oléagineux, Corps gras, Lipides*, 17(5), 276-291.

Sutton, Alex J., et al. Methods for meta-analysis in medical research. Vol. 1. Chichester: Wiley, 2000.

Tibshirani, R. (1996). Regression shrinkage and selection via the lasso. *Journal of the Royal Statistical Society. Series B (Methodological)*, 267-288.

Tscharntke, T., Karp, D. S., Chaplin-Kramer, R., Batáry, P., DeClerck, F., Gratton, C., ... & Martin, E. A. (2016). When natural habitat fails to enhance biological pest control—Five hypotheses. *Biological Conservation*, Available online 17 October 2016, ISSN 0006-3207.