



HAL
open science

Spatially-explicit modelling of green peach aphid control at the landscape level

Gaëlle van Frank, Therond Olivier, Vialatte Aude

► To cite this version:

Gaëlle van Frank, Therond Olivier, Vialatte Aude. Spatially-explicit modelling of green peach aphid control at the landscape level. *Innovations Agronomiques*, 2023, 89, pp.68-77. 10.17180/ciag-2023-vol89-art06 . hal-04338168

HAL Id: hal-04338168

<https://hal.inrae.fr/hal-04338168>

Submitted on 12 Dec 2023

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

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



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

Modélisation spatialement explicite des régulations naturelles du puceron vert à l'échelle du paysage

van Frank Gaëlle¹, Therond Olivier², Vialatte Aude¹

Adresses

¹ UMR DYNAFOR, INP de Toulouse, INRAE, Auzeville Tolosane, France

² Université de Lorraine, INRAE, LAE, F-68000 Colmar, France

Correspondance : gaelle.van-frank@inrae.fr ; aude.vialatte@inrae.fr ; olivier.therond@inrae.fr

Résumé

L'interdiction de l'usage des néonicotinoïdes impose de repenser la prophylaxie des cultures de betterave. Un levier mobilisable consiste à augmenter le contrôle naturel des pucerons verts qui sont les vecteurs de la jaunisse, grâce à une gestion adaptée du paysage. Nous avons développé un modèle spatialement explicite permettant d'explorer les effets potentiels du déploiement d'infrastructures agroécologiques, de la diversification des assolements ou de la réduction de la taille des parcelles sur la distribution des pucerons verts et l'incidence de la jaunisse dans les cultures de betterave à l'échelle de paysages. Les conditions climatiques et les traitements pesticides sont pris en compte, et les sorties des premières simulations sont cohérentes avec les connaissances expertes mobilisées. A terme, le modèle permettra d'explorer les niveaux de contrôle des pucerons par la diversité des cultures et par leurs ennemis naturels à différentes échelles (parcelle, exploitation, territoire). Les sorties constitueront des supports pour discuter avec les parties prenantes des conditions de déploiement de nouvelles modalités de gestion à l'échelle de territoires agricoles.

Mots clés : Diversification des paysages, Gestion territoriale, Régulations biologiques, Modélisation, *Myzus persicae*, Ennemis naturels, Jaunisse de la betterave

Abstract: Spatially-explicit modelling of green peach aphid control at the landscape level

The ban on the use of neonicotinoids makes it necessary to rethink the prophylaxis of beet crops. Appropriate landscape management can promote the biological control of green peach aphid vectors of yellows virus. We are developing a spatially explicit model to explore the potential effects of deploying agroecological infrastructures, diversifying crop rotation or reducing field size in reducing green peach aphids population and the incidence of beet disease at the landscape level. The model integrates climatic conditions and pesticide treatments, and preliminary outputs are consistent with available expert knowledge. We expect that the model will be used to explore the levels of control of aphids by crop diversity and their natural enemies at different scales (field, farm, territory). The outputs of simulations will be used to discuss with stakeholders the conditions for the deployment of new management methods at the landscape scale.

Keywords: Landscape diversification, Territorial management, Biological regulations, Modelling, *Myzus persicae*, Natural enemies, Beet yellows disease

Introduction

On s'attend dans le futur à une augmentation globale des températures et des concentrations en CO₂ atmosphérique qui vont impacter fortement la production agricole et pourraient aussi favoriser, dans les régions tempérées, les ravageurs des cultures, organismes particulièrement adaptés à des conditions plus chaudes (Skendžić *et al.* 2021). On estime qu'une augmentation moyenne de température de 2°C sur le globe entraînera une perte de rendement due aux insectes de 19 à 31% sur les principales céréales (blé, maïs, riz ; Deutsch *et al.* 2018). Pour autant, l'agriculture, qui contribue au changement climatique tout en souffrant directement, doit engager une évolution de ses pratiques, et notamment réduire sa dépendance aux produits phytosanitaires, ce qui nécessite de trouver des alternatives pour gérer les populations de ravageurs.

La diversification des paysages agricoles est un levier prometteur pour contrôler les populations de ravageurs des cultures et ainsi aider à réduire l'usage des produits phytosanitaires en agriculture (Gurr *et al.* 2017). Cette diversification induit à la fois l'augmentation des populations d'ennemis naturels des ravageurs, qui vont réguler ces derniers par la prédation et le parasitisme, et la réduction de la surface relative occupée par la culture hôte du bioagresseur dans le temps et l'espace, réduisant la ressource leur étant favorable (Schellhorn *et al.* 2015). L'implantation d'habitats semi-naturels, tels que les haies, les bandes enherbées ou fleuries ou encore les prairies, ainsi que la réduction de la taille des parcelles et la diversification des cultures sont des leviers connus pour favoriser les régulations naturelles (Vialatte *et al.*, 2023). C'est ainsi à la fois la composition du paysage et l'agencement spatial des cultures et des habitats semi-naturels, c'est-à-dire sa configuration, qui impactent les régulations naturelles (Estrada-Carmona *et al.* 2022, Martin *et al.* 2019). Toutefois, si l'effet positif de la diversification du paysage est bien reconnu, sa déclinaison en modalité de gestion sur un territoire donné est rendue difficile par la forte dépendance aux processus écologiques en jeu et au contexte local (Karp *et al.* 2018, Ratsimba *et al.* 2022). En effet, les effets du paysage interagissent avec les caractéristiques écologiques des ravageurs et des ennemis naturels (capacité de dispersion, sites d'hivernation et d'alimentation), les systèmes de culture en place et les conditions climatiques. De plus, au sein d'une parcelle donnée, les effets de la structure du paysage peuvent être fortement modulés par les pratiques agricoles (Ricci *et al.* 2019, Petit *et al.* 2021). Mettre en œuvre des expérimentations *in situ* à l'échelle du paysage pour tester des organisations de cultures et d'habitats semi-naturels est concrètement difficile et s'inscrit dans le moyen voire long terme. La modélisation numérique est une voie opérationnelle pour explorer et concevoir des stratégies de gestion du paysage pour la régulation des ravageurs, considérant les spécificités biophysiques et socio-techniques d'un paysage donné (Tixier *et al.* 2013).

Dans cet article, nous traitons du cas particulier de la résurgence de la jaunisse de la betterave qui a été observée depuis l'interdiction de l'usage de traitements néonicotinoïdes. Cette maladie est due à un complexe de virus appartenant à différentes familles ayant des modes de transmission divers, dont les poléovirus. Ces virus sont transmis par des pucerons, le principal vecteur étant *Myzus persicae*, le puceron vert du pêcher. Les fortes pullulations de ces pucerons, notamment en 2020, ont conduit à l'octroi de dérogations temporaires à l'usage des néonicotinoïdes, en 2021 et 2022. Un plan national de recherche et d'innovation (PNRI) est en cours pour définir des solutions opérationnelles alternatives pour lutter contre la jaunisse de la betterave. C'est dans le cadre de ce plan que nous développons un modèle spatialement explicite pour simuler, sur des paysages réels des bassins de production de betterave sucrière, différents scénarios de diversification du paysage et de pratiques agricoles, afin d'évaluer leurs impacts potentiels sur la régulation du puceron vert, la propagation de la jaunisse et les pertes de rendement associées à la maladie. L'exploration de ces scénarios doit permettre d'identifier et de prioriser des leviers d'actions favorisant les régulations biologiques. Ce modèle est à visée exploratoire et constitue un outil de dialogue entre différentes parties prenantes (agriculteurs, conseillers agricoles, gestionnaires territoriaux, décideurs politiques) pour concevoir des solutions à l'échelle du paysage. Cet outil servira à l'identification de priorités de recherche et de dispositifs expérimentaux à tester à l'échelle du paysage.

1. Développement du modèle

Le modèle en cours de développement est un modèle mécaniste et spatialement explicite qui est développé sur la plateforme de modélisation GAMA® (Taillandier *et al.*, 2018).

1.1 Hypothèses

Le modèle se focalise sur le puceron *Myzus persicae*, principal vecteur des virus de la jaunisse. Bien que d'autres pucerons soient vecteurs de ces virus, les connaissances sur l'acquisition et la transmission des virus par ces espèces de puceron sont actuellement plus limitées. Dans ce modèle, nous considérons uniquement les polérovirus, dont deux virus provoquent la jaunisse de la betterave (BChV et BMVYV). Ces polérovirus sont prépondérants dans les infections ces dernières années. Enfin, considérant qu'en France les hivers sont suffisamment doux pour permettre aux pucerons de survivre sans passer par une phase de reproduction sexuée, nous considérons que la dynamique des populations l'année $n+1$ est initiée par des individus descendants des populations présentes dans le paysage l'année n et ayant survécu aux rigueurs hivernales, localisées sur les parcelles de colza. Ainsi, la population de pucerons au printemps est composée de descendants des populations ayant survécu localement à l'hiver, et de pucerons colonisant le paysage par le processus de migration. Enfin, les réservoirs à partir desquels les pucerons acquièrent les virus avant de les transmettre à la betterave étant peu connus, ils ne sont pas représentés explicitement dans le modèle. Les virus sont introduits dans le paysage par les pucerons colonisant ce dernier au printemps (par la migration). Considérant qu'une proportion de ces pucerons, constante entre années, est porteuse des virus, ces derniers vont inoculer les plantes suite à leur atterrissage.

1.2 Structure du modèle

La structure du modèle est présentée dans la figure 1. Il représente la dynamique pluriannuelle des populations du puceron vert au sein d'un paysage, considérant les conditions météorologiques, les traitements pesticides aériens, la composition et la configuration du paysage et l'action de régulation par les ennemis naturels du puceron. La propagation de la maladie résulte de sa transmission des pucerons aux betteraves au cours de la saison de culture.

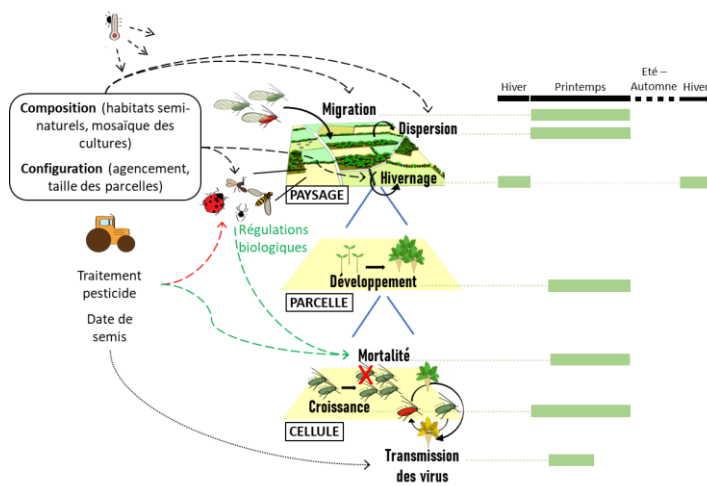


Figure 1. Principales composantes du modèle de simulation dynamique des relations paysages, pratiques agricoles, pucerons, ennemis naturels, jaunisse de la betterave. Le modèle simule les dynamiques de population de pucerons (hivernage, migration, dispersion, croissance, mortalité), le développement des cultures, ainsi que certaines pratiques agricoles (semis, traitement pesticide) et la transmission des virus de la jaunisse entre pucerons et plantes (pucerons de couleur verte : sains ; rouge : pucerons virulifères ; betterave au feuillage jaune : infectée). Les processus sont représentés à trois échelles différentes

emboîtées (paysage, composé de parcelles, composées de cellule d'un hectare à laquelle est attribuée une occupation du sol). Les facteurs paysagers, les pratiques agricoles et la phénologie des cultures ont des effets directs (tirets) ou indirects (pointillés) sur la dynamique de population de pucerons et la transmission des virus de la jaunisse. La période saisonnière associée à chaque processus est indiquée sur la droite de la figure. Les températures influencent directement l'ensemble des processus hormis la prédation et la transmission des virus à l'échelle de la cellule.

1.3 Processus modélisés

1.3.1 Support spatialisé

Le modèle représente des dynamiques de populations sur des pas de temps journaliers, et des paysages réels (ex. 50 km²), discrétisés suivant une grille composée de cellules d'un hectare. Les données du Registre Parcellaire Graphique (RPG) sont utilisées pour affecter une occupation du sol à chaque cellule, et la couche végétation de la BDTPOO® est utilisée pour spatialiser les habitats semi-naturels, c'est-à-dire assigner une surface en habitats semi-naturels à chaque cellule. Le RPG permet de spatialiser des séquences de culture.

1.3.2 Phénologie des cultures

Le développement des cultures est explicitement représenté pour les cultures hôtes du puceron vert présentes dans les paysages : betterave, colza, pomme de terre, maïs et prairies. Le stade de développement de la plante hôte influence différents processus en jeu dans la propagation de la maladie : la croissance des populations de pucerons, leur dispersion entre parcelles (statut en végétation ou sol nu de la parcelle) et l'efficacité de transmission des virus entre puceron et betterave.

1.3.3 Dynamique du puceron vert

Les dynamiques de population de pucerons sont explicitement représentées du printemps jusqu'au début de l'été. Ensuite, les populations de pucerons sont réduites en fonction de la surface en colza dans le paysage à l'automne. Au cours de l'hiver, les pucerons hivernent localement sur les parcelles en colza, et ont un taux de croissance négatif, d'autant plus important que les températures sont basses (Howling *et al.* 1994). La reprise de croissance des populations au printemps est également dépendante des températures, pouvant être ainsi plus ou moins précoce. Au printemps, outre le pool de pucerons hivernant localement, des pucerons arrivent également de sources extérieures au paysage après un déplacement de longue distance par vol passif, emportés par les masses d'airs (processus de migration). L'abondance journalière de cette « pluie de pucerons » est prédite en fonction des conditions climatiques hivernales et de la composition régionale en cultures et habitats semi-naturels (Luquet *et al.* in prep, projet SEPIM du PNRI ; Fabre *et al.* 2021). Les pucerons survivant à l'hiver, ainsi que les pucerons migrant depuis l'extérieur vers le paysage, contribuent à la croissance de la population locale au printemps. Cette croissance est modulée par la température ainsi que la famille botanique et le stade de développement de la plante hôte (Whalon 1979, Williams 1995). La dispersion (mouvement local) de pucerons ailés entre parcelles est déclenchée par la réduction de la qualité nutritionnelle de la plante au fur et à mesure de son développement phénologique (Müller *et al.* 2001). Enfin, la mortalité des pucerons est due aux traitements pesticides ainsi qu'à l'action des ennemis naturels. Les effets des traitements pesticides sont paramétrés sur l'efficacité du Teppeki, recommandé par l'Institut Technique de la Betterave (ITB 2022), en considérant également des effets létaux sur les ennemis naturels présents dans la parcelle. Le traitement a pour effet de réduire les populations de pucerons sur l'ensemble des cellules composant la parcelle traitée de 75%, avec un effet les jours suivant le traitement sur les pucerons atterrissant sur ces mêmes cellules. Les effets sur les ennemis naturels sont paramétrés en tenant compte des effets directs (létaux) et indirects (réduction de la ressource localement), avec un effet plus important sur les insectes aériens que les insectes rampants.

Les dynamiques de population des ennemis naturels ne sont pas représentées explicitement. Les ennemis naturels considérés dans le modèle sont des archétypes (pas d'espèces précises) connus pour prédateur ou parasiter des pucerons : ennemis spécialistes (parasitoïdes) et généralistes (coccinelles adultes et larves, araignées, carabes, syrphes, chrysopes et staphylins). Le formalisme implémenté est adapté de Jonsson *et al.* (2014), considérant que l'abondance des différents ennemis naturels est calculée en fonction de la proportion en habitats hôtes à proximité dans un rayon variant selon l'organisme considéré. Par exemple, l'abondance des araignées (dispersion au sol) est favorisée par la présence d'habitats semi-naturels à des distances plus courtes que pour les coccinelles (dispersion par le vol). La mortalité des pucerons due aux ennemis naturels est alors calculée en fonction des taux d'attaque

maximum de chaque ennemi et de leur abondance, ainsi que de la densité de pucerons. En effet, on considère que plus la densité de pucerons est faible, moins le nombre de pucerons prédatés par ennemi est important.

Table 1. Taux d'attaque maximal de chaque ennemi naturel considéré dans le modèle. Lorsque les ennemis naturels sont actifs, le taux de mortalité appliqué est calculé en fonction de ce taux d'attaque maximal, de l'abondance en ennemis naturels et en pucerons sur la cellule.

Ennemi naturel		Taux d'attaque maximal per capita (nombre de proies/jour/ennemi naturel)	Référence
Parasitoïdes		20	Kumar <i>et al.</i> (2019), Tahriri <i>et al.</i> (2007)
Carabes		20	Loughridge <i>et al.</i> (1983)
Araignées	Lycosidae	1	Nyffeler <i>et al.</i> (1988)
	Linyphiidae	15 / m ² de toile	Sunderland <i>et al.</i> (1986)
Coccinelles	Adulte	65	Omkar <i>et al.</i> (2003), Xia <i>et al.</i> (2003)
	Larve	80	
Syrphes		33	Hopper <i>et al.</i> (2011)
Staphylins		10	Vickerman <i>et al.</i> (1988)
Chrysopes		13	Latham <i>et al.</i> (2009)

1.3.4 Transmission des virus de la jaunisse de la betterave

Les virus sont introduits dans le paysage par le processus de migration, la « pluie de pucerons » étant composée de pucerons sains et de pucerons porteurs de virus. La proportion de pucerons virulifères dans le paysage au printemps dépend donc de l'abondance des pucerons issus de la migration, et de celle des pucerons ayant hiverné localement qui sont tous sains. Les plantes infectées deviennent elles-mêmes source d'infection pour les pucerons après une période de latence (6% des plantes en latence deviennent infectieuses à chaque pas de temps ; E. Jacquot communication personnelle). La maladie est propagée entre parcelles par les pucerons ailés virulifères (processus de migration et de dispersion), et entre plantes voisines par les pucerons aptères se déplaçant de plante en plante. L'efficacité de transmission des polérovirus depuis le puceron vers la plante décline avec l'avancée en maturité de la plante (jusqu'au stade 12 feuilles). La perte de rendement due à l'infection est représentée considérant que plus une plante est infectée tardivement et moins la perte de rendement associée est forte, la perte de rendement maximale étant fixée à 30% (ITB 2020) puisque seuls les polérovirus sont pris en compte.

2. Tests de comportement du modèle

Des simulations exploratoires ont été effectuées sur un paysage du Sud du bassin Parisien de 49 km² (carré de 7x7 km) dans le but d'explorer et valider la cohérence du comportement du modèle.

Ce paysage réel présenté Figure 2 contient 13.7% de surface en habitats semi-naturels, principalement boisés. Les cultures de betterave ainsi que de colza représentent chacune, selon les années, 1 à 6% de la surface cultivée. Deux paramètres ont été testés selon un plan factoriel : l'activité des ennemis naturels (actifs ou inactifs) et/ou les traitements pesticides (aucun traitement ou 2 traitements maximum autorisés).

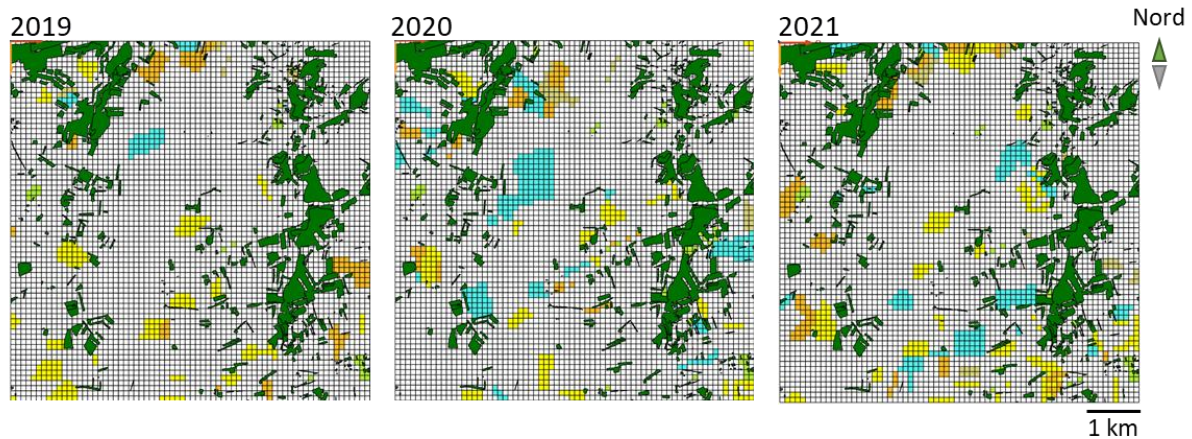


Figure 2. Paysage simulé sur 3 années, au 1^{er} mai des années 2019 à 2021. Les habitats semi-naturels sont représentés en vert foncé. Les cellules de la grille cultivées avec une culture hôte du puceron vert sont colorées (jaune : betterave ; bleu : colza ; orange : maïs ; beige : pomme de terre ; vert clair : prairie).

La figure 3 présente des exemples de simulations effectuées sur ce paysage réel. Le modèle n’ayant pas encore été calibré et validé, les sorties présentées ci-après visent uniquement à vérifier que les taux d’incidence obtenus sont effectivement plus faibles lorsque les ennemis naturels et/ou les traitements pesticides sont activés, et que les taux d’infection obtenus sont plus importants en 2020. Chacun des graphiques correspond aux sorties d’une simulation, et présente la proportion de betteraves infectées par parcelle

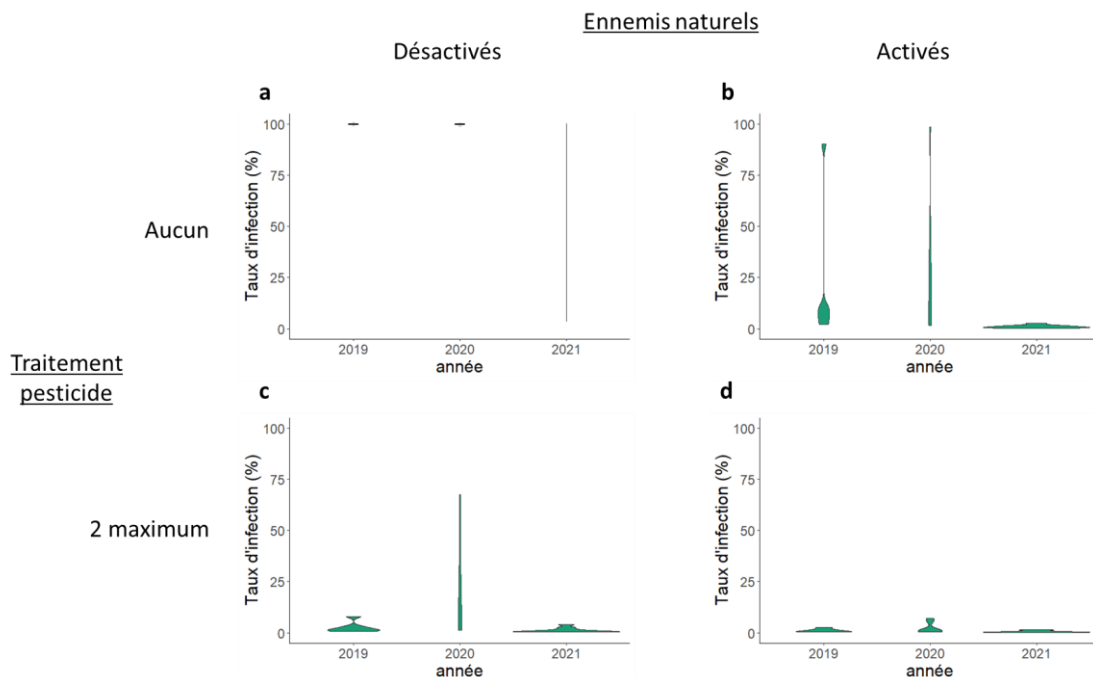


Figure 3. Distribution des incidences moyennes par parcelle de la maladie (proportion de plantes infectées), issue d’une exploration du comportement du modèle avant sa calibration sur 2 paramètres : l’activité des ennemis naturels (activés ou désactivés) et les traitements pesticides (aucun traitement ou deux traitements maximum autorisés).

On observe que l’ajout de l’activité des ennemis naturels et l’application de pesticides (Fig 3b, c, d) conduisent à des niveaux d’infection bien plus faibles qu’en situation sans traitements et sans activité de ces ennemis naturels (Fig 3a). De plus, les taux d’infection obtenus en 2020 sont supérieurs à ceux des deux autres années, ce qui est cohérent avec ce qui a été observé dans les champs.

On constate une efficacité très importante de l'application de pesticides, qui n'est pas observée dans la réalité. Ceci peut s'expliquer par un déclenchement de traitements optimisé (intervention pour un seuil d'infestation par les pucerons telle que recommandé par l'ITB) pour l'ensemble des parcelles du paysage, ce qui n'est pas le cas en conditions réelles où il y a un étalement des traitements dans le temps. Les résultats préliminaires de test de l'effet de l'augmentation de la valeur de seuil de présence de pucerons pour déclencher les traitements pesticides montrent des efficacités moindres de ces traitements sur la limitation de l'incidence de la maladie.

Ces sorties de simulation montrent que le modèle se comporte de manière cohérente relativement aux connaissances expertes mobilisées.

3. Les étapes à venir

3.1 Analyses de sensibilité du modèle

Plusieurs paramètres du modèle sont incertains du fait du manque de connaissances, notamment concernant les caractéristiques biologiques de certains types d'ennemis naturels (taux d'attaque variables dans la littérature selon les espèces, incertitude de la transposabilité de résultats obtenus en laboratoire vers le champ par exemple). Aussi, nous avons transposé des connaissances disponibles sur d'autres espèces de pucerons, comme par exemple les pucerons des céréales qui ont été plus largement étudiés que les pucerons verts sur betterave sucrière (par exemple des taux de prédation). Une analyse de la sensibilité du modèle à ces hypothèses en termes de sorties d'intérêt (efficacité du contrôle biologique, niveaux d'infection à la jaunisse et perte de rendement associée) sera conduite afin d'apprécier la robustesse des conclusions aux incertitudes sur les valeurs de ces paramètres. Les facteurs les plus influents seront paramétrés par une calibration du modèle sur des données issues du réseau d'épidémiosurveillance Vigicultures[®]. Les données utilisées correspondent à des suivis de proportion de betteraves infestées par des pucerons durant la saison de culture, et des proportions de betteraves présentant des symptômes de jaunisse. Enfin, l'influence des différents facteurs pris en compte dans le modèle, notamment la composition et la configuration du paysage, sera estimée via une analyse de sensibilité afin d'identifier les leviers de gestion les plus prometteurs.

3.2 Test de scénarios de diversification du paysage

Le modèle permet d'évaluer les effets des scénarios de gestion du paysage et des pratiques agricoles sur (1) l'efficacité des régulations naturelles c.-à-d. l'évolution des populations de pucerons, (2) la propagation de la jaunisse (surfaces infectées) et (3) les pertes de rendement associées à la jaunisse de la betterave. Les scénarios testés suivront un gradient d'importance des changements apportés aux agroécosystèmes actuels : depuis une implantation d'habitats semi-naturels jusqu'à des changements dans les systèmes de culture (changement de rotations pour diversifier la mosaïque des cultures et réduire les surfaces en culture hôte du puceron, et/ou de pratiques) et la taille des parcelles. Différents leviers seront testés séparément ainsi qu'en combinaison. Selon les objectifs et contraintes territoriales, différentes combinaisons de leviers, déterminées par les parties prenantes, pourront être testées.

4. Attendus et perspectives

Les résultats du projet seront multiples. Tout d'abord, la synthèse des connaissances nécessaires au développement du modèle a permis de mettre en lumière des manques de connaissances scientifiques, par exemple, sur l'activité des ennemis naturels dans les zones de production de la betterave. Les résultats de l'analyse de l'impact des valeurs des paramètres introduits dans le modèle sur les sorties d'intérêt nous permettront de formuler des priorités de recherche pour affiner les connaissances sur ces

paramètres et ainsi mieux comprendre le fonctionnement du contrôle biologique en lien avec le paysage et les pratiques agricoles.

Ensuite, l'exploration de scénarios de gestion du paysage pour réduire la pression en pucerons sans recourir aux insecticides donnera des pistes pour des dispositifs d'expérimentation à l'échelle du paysage, tant pour la filière betteravière et l'ITB que pour d'autres filières également présentes dans ces territoires.

Le modèle pourra être enrichi pour intégrer des combinaisons de solutions alternatives identifiées dans le cadre du PNRI, comme par exemple le semis de plantes compagnes répulsives vis-à-vis du puceron en combinaison avec le semis en dehors des parcelles de betterave de plantes attractives, ou encore introduire des mécanismes de résistance variétale. De plus, les travaux en cours dans le cadre du PNRI visant à mieux comprendre la maladie, notamment l'identification des réservoirs de virus pendant l'hiver et source d'infection, apporteront des connaissances clefs qui pourront être intégrées au modèle.

Enfin, le modèle pourra être utilisé dans un processus d'accompagnement de la conception de systèmes à très faible niveau de pesticides ou sans pesticides, les scénarios pouvant servir de support à la concertation pour la mise en place de modalités de gestion du paysage favorisant les régulations biologiques. L'analyse de sensibilité fournira des informations clefs sur le poids des différents facteurs dans l'incidence de la jaunisse à l'échelle du paysage, orientant ainsi les priorités de gestion dans les territoires.

A terme, le modèle a vocation à être couplé avec des modèles existants représentant les effets du paysage et des systèmes de culture sur la régulation naturelle des pucerons des céréales et du méligèthe du colza. Ceci permettra d'explorer des scénarios de gestion efficaces pour le contrôle des différents ravageurs impactant les cultures présentes dans les zones de production de la betterave.

Références bibliographiques

- Deutsch C.A., Tewksbury J.J., Tigchelaar M., Battisti D.S., Merrill S.C., Huey R.B., Naylor R.L., 2018. Increase in crop losses to insect pests in a warming climate. *Science* 361: 916-919.
- Estrada-Carmona N., Sánchez A.C., Remans R., Jones S.K., 2022. Complex agricultural landscapes host more biodiversity than simple ones: A global meta-analysis. *Proceedings of the National Academy of Sciences* 119: e2203385119.
- Fabre F., Dedyver C.-A., Plantegenest M., Hullé M., Rivot E. 2021. Hierarchical Bayesian modelling of plant colonisation by winged aphids: inferring dispersal processes by linking aerial and field count data ». *Ecological Modelling* 221(15): 1770-78.
- Gurr G.M., Wratten S.D., Landis D.A., You M., 2017. Habitat management to suppress pest populations: progress and prospects. *Annual Review of Entomology* 62: 91-109.
- Hopper J.V., Nelson E.H., Daane K.M., Mills N.J. 2011. Growth, development and consumption by four syrphid species associated with the lettuce aphid, *Nasonovia Ribisnigri*, in California. *Biological Control* 58 (3): 271-76.
- Howling G.G., Bale J.S., Harrington R., 1994. Effects of extended and repeated exposures to low temperature on mortality of the Peach-Potato aphid *Myzus Persicae*. *Ecological Entomology* 19: 361-66.
- ITB 2020. F.A.Q. L'essentiel sur la jaunisse : biologie, transmission, surveillance et méthodes de lutte. Consulté le 13/04/2023. <https://www.itbfr.org/tous-les-articles/article/news/f-a-q-tout-savoir-sur-la-jaunisse/>
- ITB 2022. Lutte contre les pucerons verts. Consulté le 01/02/2023. www.itbfr.org/tous-les-articles/article/news/lutte-contre-les-pucerons-verts/
- Jonsson M., Bommarco R., Ekbom B., Smith H.G., Bengtsson J., Caballero-Lopez B., Winqvist C., Olsson O., 2014. Ecological production functions for biological control services in agricultural landscapes. *Methods in Ecology and Evolution* 5: 243-52.
- Karp D.S., Chaplin-Kramer R., Meehan T.D., Martin E.A., DeClerck F., Grab H., Gratton C., et al., 2018. Crop pests and predators exhibit inconsistent responses to surrounding landscape composition. *Proceedings of the National Academy of Sciences* 115: E7863-70.
- Kumar S., Kashyap S., Soni S. 2019. The foraging behaviour of *Aphelinus Asychis* Walker (Hymenoptera: Aphelinidae) and *Aphidius Ervi* (Haliday) (Hymenoptera: Braconidae) on *Myzus Persicae* (Sulzer) (Hemiptera: Aphididae) ». *Phytoparasitica* 47(3): 351-60.
- Latham, D.R., Mills N.J. 2009. Quantifying insect predation: a comparison of three methods for estimating daily per capita consumption of two aphidophagous predators. *Environmental Entomology*, 38:1117-25.
- Loughridge A.H., Luff M.L. 1983. Aphid predation by *Harpalus rufipes* (Degeer) (Coleoptera: Carabidae) in the laboratory and field. *Journal of Applied Ecology* 20(2): 451-62.
- Martin E.A., Dainese M., Clough Y., Báldi A., Bommarco R., Gagic V., Garratt M.P.D., et al., 2019. The interplay of landscape composition and configuration: new pathways to manage functional biodiversity and agroecosystem services across Europe. *Ecology Letters* 22: 1083-94.
- Müller C.B., Williams I.S., Hardie J., 2001. The role of nutrition, crowding and interspecific interactions in the development of winged aphids. *Ecological Entomology* 26: 330-40.
- Nyffeler, M., Benz, G. 1988. Feeding ecology and predatory importance of Wolf Spiders (*Pardosa* Spp.) (Araneae, Lycosidae) in winter wheat fields. *Journal of Applied Entomology* 106 (1-5) : 123-34.
- Omkar, Srivastava S. 2003. Influence of six aphid prey species on development and reproduction of a ladybird beetle, *Coccinella Septempunctata*. *BioControl* 48(4) : 379-93.
- Petit S, Deytieux V., Cordeau S. 2021. Landscape-scale approaches for enhancing biological pest control in agricultural systems. *Environmental Monitoring and Assessment* 193: 75.
- Ratsimba N., Therond O., Parry H., Monteil C., Vialatte A., 2022. Inconsistent responses of conservation biocontrol to landscape structure: new insights from a network-based review. *Ecological Applications* 32: e2456

- Ricci, B., C. Lavigne, A. Alignier, S. Aviron, L. Biju-Duval, J. C. Bouvier, J.-P. Choisis, et al., 2019. Local pesticide use intensity conditions landscape effects on biological pest control. *Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences* 286: 20182898.
- Schellhorn N.A., Gagic V., Bommarco R., 2015. Time will tell: resource continuity bolsters ecosystem services. *Trends in Ecology & Evolution* 30: 524-30.
- Skendžić S., Zovko M., Živković I.P., Lešić V., Lemić D., 2021. The impact of climate change on agricultural insect pests. *Insects* 12: 440.
- Tahriri S., Talebi A.A., Fathipour Y., Zamani A.A. 2007. Host stage preference, functional response and mutual interference of *Aphidius Matricariae* (Hym.: Braconidae: Aphidiinae) on *Aphis Fabae* (Hom.: Aphididae) ». *Entomological Science* 10(4): 323-31.
- Taillandier P., Gaudou B., Grignard A., Huynh Q.N., Marilleau N., Caillou P., Philippon D., Drogoul A. (2018), Building, composing and experimenting complex spatial models with the GAMA platform. In *Geoinformatica*, Springer.
- Tixier P., Duyck P-F., Côte F-X., Caron-Lormier G., Malézieux E., 2013. Food web-based simulation for agroecology. *Agronomy for Sustainable Development* 33 (2013): 663-70.
- Vialatte A., Martinet V., Tibi A. (coord.) et al., 2022. Augmenter la diversité végétale des espaces agricoles pour favoriser la régulation naturelle des bioagresseurs et protéger les cultures. Rapport scientifique d'ESCo – INRAE (France).
- Vickermann G.P., Dowie W., Playle K.E. 1988. The potential of *Tachyporus* spp. (Coleoptera: Staphylinidae) as predators of cereal aphids. In *Integrated Crop Protection in Cereals*. Edité par Cavalloro R. et Sunderland K.D. 69-80.
- Whalon M.E., Smilowitz Z., 1979. Temperature-dependent model for predicting field populations of green peach aphid, *Myzus persicae* (Homoptera: Aphididae). *The Canadian Entomologist* 111: 1025-32.
- Williams, C. T., 1995. Effects of plant age, leaf age and virus yellows infection on the population dynamics of *Myzus Persicae* (Homoptera: Aphididae) on sugarbeet in field plots. *Bulletin of Entomological Research* 85: 557-67.
- Xia J.Y., Rabbinge R., Van Der Werf W. 2003. Multistage functional responses in a ladybeetle-aphid system: scaling up from the laboratory to the field. *Environmental Entomology* 32(1): 151-62.



Cet article est publié sous la licence Creative Commons (CC BY-NC-ND 4.0)

<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>

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