



HAL
open science

L'outil ODACE. Accompagner la réduction de l'usage des produits phytopharmaceutiques en vergers de pommiers

Julie Borg, Isabelle Grechi, Jean-Noël Aubertot, Pascal Borioli, Pierre Franck, Bertrand Gauffre, Hélène Gautier, Baptiste Labeyrie, Françoise Lescourret, Vincent Mercier, et al.

► To cite this version:

Julie Borg, Isabelle Grechi, Jean-Noël Aubertot, Pascal Borioli, Pierre Franck, et al.. L'outil ODACE. Accompagner la réduction de l'usage des produits phytopharmaceutiques en vergers de pommiers. *Innovations Agronomiques*, 2026, 110, pp.69-80. <10.17180/ciag-2026-vol110-art06>. <hal-05502330>

HAL Id: hal-05502330

<https://hal.inrae.fr/hal-05502330v1>

Submitted on 10 Feb 2026

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 CC BY-NC-ND 4.0 - Attribution - Non-commercial use - No Derivative Works - International License



L'outil ODACE. Accompagner la réduction de l'usage des produits phytopharmaceutiques en vergers de pommiers

Julie BORG¹; Isabelle GRECHI^{2,3}; Jean-Noël AUBERTOT⁴; Pascal BORIOLI⁵; Pierre FRANCK¹; Bertrand GAUFFRE¹; Hélène GAUTIER¹; Baptiste LABEYRIE⁶; Françoise LESCOURRET¹; Vincent MERCIER⁷; Frédéric NORMAND^{8,3}; Félix OURGAUD^{1,4}; Julien RUESCH⁹; Marie-Hélène ROBIN⁴; Antoine ROLLAND¹⁰; Pierre VALSESIA¹; Gilles VERCAMBRE¹; Mohamed-Mahmoud MEMAH¹

¹ INRAE, UR Plantes et Systèmes de culture Horticoles, -84914 Avignon, France.

² CIRAD, UPR HortSys, -34398 Montpellier, France.

³ HortSys, Univ Montpellier, CIRAD, Montpellier, France.

⁴ INRAE, UMR AGIR AGroécologie - Innovations – TeRritoires, 31326 Castanet Tolosan, France.

⁵ GRCETA de Basse Durance, 13210 Saint-Rémy-de-Provence, France.

⁶ CTIFL, 26800 Etoile-sur-Rhône, France.

⁷ INRAE, UE Recherches Intégrées Gotheron, 26320 Saint Marcel-lès-Valence, France.

⁸ CIRAD, UPR HortSys, 97455 Saint-Pierre, Réunion, France.

⁹ CTIFL site de Balandran 30127 Bellegarde, France.

¹⁰ Université Lyon 2, Laboratoire ERIC ER3083, 5 avenue Pierre Mendès France, 69676 Bron Cedex, France.

Correspondance : julie.borg@inrae.fr

Résumé : Réduire l'utilisation des produits phytopharmaceutiques (PPP) en agriculture est un défi majeur. Pour relever ce défi, les acteurs des filières ont besoin d'outils pour les accompagner dans la conception de stratégies de gestion des cultures moins dépendantes des PPP. L'outil ODACE, développé pour la filière pomicole, est une interface ergonomique et interactive qui propose à l'utilisateur différents scénarios alternatifs à ses pratiques actuelles, sélectionnés à partir d'une large palette de scénarios, en prenant en compte son contexte de production, ses préférences et/ou ses contraintes en termes de pratiques agricoles et de performances. Le fonctionnement de l'outil est d'abord décrit, qui explicite notamment les méthodes utilisées pour sélectionner les scénarios alternatifs, puis son utilisation est illustrée sur un cas d'étude.

Mots-clés : bioagresseurs multiples, pommier, stratégies de protection des bioagresseurs, évaluation multicritère, services écosystémiques

Abstract: ODACE: a tool to help reduce the use of plant protection products in orchards

Reducing the use of plant protection products (PPP) in agriculture is a major challenge. To meet this challenge, the stakeholders need tools to help them devise crop management strategies that are less dependent on PPP. The ODACE tool has been developed for the apple sector. An ergonomic, interactive interface suggests to users different alternative scenarios to their practices, selected from a large set of scenarios, considering their production context and their preferences and/or constraints in terms of farming practices and performances. The tool is described, explaining the methods used to select alternative scenarios, and its use is illustrated through a case study. The ODACE tool is intended as a support tool to facilitate dialogue between stakeholders on the agro-ecological transition.

Keywords: apple, ecosystem services, multicriteria evaluation, multiple pests, orchards, sustainable pest management



1. Introduction

L'utilisation massive de produits phytopharmaceutiques (PPP) en agriculture est de plus en plus décriée en raison de ses conséquences néfastes sur l'environnement, la biodiversité, et la santé humaine (Inserm, 2021; Mamy *et al.*, 2022). Ceci concerne particulièrement l'arboriculture qui est très consommatrice de PPP (Agreste, 2021), poussée en partie par une exigence sociétale pour des fruits sans défauts. Dans ce contexte, il est urgent d'accompagner les acteurs de la filière dans une transition agroécologique, et notamment dans leur réflexion sur la mise en place de stratégies de réduction de l'usage des PPP. Ces stratégies nécessitent une maîtrise durable des bioagresseurs s'appuyant sur la combinaison de plusieurs pratiques alternatives, chacune ayant souvent une efficacité partielle (Ricci *et al.*, 2011). Ces pratiques peuvent être liées à la conception (e.g., choix variétal) ou à la conduite des vergers (e.g., pratiques culturales, introduction de biodiversité planifiée, utilisation de produits de biocontrôle, mise en place de barrières physiques, etc). La transition agroécologique implique par ailleurs de ne plus seulement considérer les performances agronomiques et économiques des agroécosystèmes, mais aussi leurs performances environnementales. En outre, les acteurs de la filière peuvent être confrontés à des contextes environnementaux différents, et avoir des préférences (ou des contraintes) contrastées vis-à-vis des pratiques mobilisées et des performances attendues. Pour la mise au point de stratégies de gestion des bioagresseurs moins dépendantes des PPP, il est donc nécessaire de soutenir les approches intégrées qui combinent de multiples pratiques alternatives, de multiples performances et de multiples contextes et profils d'acteurs.

La modélisation constitue une approche prometteuse pour accompagner les acteurs de la filière dans cette démarche. Les approches basées sur des modèles pour aider à la conception de systèmes de production intégrée ont suscité un intérêt croissant (Ould-Sidi et Lescourret, 2011). La modélisation permet d'explorer un grand nombre de scénarios et de cibler les scénarios prometteurs à tester *in situ*, ce qui permet de contourner la lenteur de l'expérimentation et de réduire son coût très élevé. Elle peut également aider à concevoir et évaluer des stratégies dans des situations hypothétiques futures, en lien par exemple avec le changement climatique. Par sa capacité d'intégration, la modélisation offre un cadre privilégié pour capitaliser et combiner des expertises (données qualitatives) et des observations de terrain (données quantitatives), parfois éparses et partielles. Plusieurs outils d'évaluation de la durabilité des agroécosystèmes ont été développés ces dernières décennies (Alaphilippe *et al.*, 2017). Ces outils mobilisent le plus souvent des arbres de décision permettant la combinaison d'informations, souvent à dire d'experts, sous forme de règles de décision simples. Ces outils ont fait preuve de leur utilité auprès des acteurs du monde agricole pour évaluer des stratégies innovantes, mais ne sont pas bien adaptés à la conception de nouvelles stratégies car il est difficile de les connecter à des algorithmes d'optimisation permettant d'explorer une gamme élargie de possibilités.

Dans le cadre du projet ODACE (Appel à projet « Durabilité des systèmes agricoles alternatifs », Ecophyto 2+, 2019), un outil a été spécifiquement développé pour accompagner les acteurs de la filière arboricole dans la mise en place de stratégies de réduction de l'usage des PPP. Cet outil, également dénommé ODACE, se veut facile d'utilisation et générique dans sa démarche et son champ d'utilisation. Sous la forme d'interfaces ergonomiques et interactives, il propose à l'utilisateur plusieurs scénarios de pratiques alternatives aux PPP, qui prennent en compte son contexte, ses propres objectifs et ses préférences. Les performances de ces scénarios alternatifs sont décrites par des indicateurs de services écosystémiques relatifs à la production de fruits, la régulation des bioagresseurs, la régulation du climat, la disponibilité de l'azote dans le sol, et le maintien et la régulation du cycle de l'eau. Pour cela, l'outil mobilise des modèles hiérarchiques d'arbres de décision à dire d'experts, combinés à un modèle mécaniste de culture pour représenter les effets des pratiques agricoles et de facteurs environnementaux sur les bioagresseurs et les performances des vergers. Il utilise des méthodes d'optimisation ou de classification pour générer des scénarios alternatifs adaptés à chaque profil d'acteur. Le pommier a été choisi comme plante modèle pour déployer cette démarche.

Dans cet article, nous présentons d'abord l'outil ODACE et son fonctionnement, puis nous appliquons l'outil sur un cas d'étude pour illustrer la démarche de co-conception de stratégies de réduction de l'usage des PPP pour le pommier.

2. Méthodologie : description de l'outil

L'outil ODACE se présente comme une interface ergonomique et interactive développée avec le logiciel R (version 4.4.3; R Core Team, 2025) et la librairie 'shiny' (version 1.10; Chang *et al.*, 2024). L'interface R shiny est composée de cinq onglets principaux qui permettent à l'utilisateur d'interagir avec l'outil à travers la saisie d'informations ainsi que la recherche et la visualisation des scénarios proposés. Derrière ces interfaces, se cache le cœur de l'outil qui gère une large palette de scénarios générés et évalués par modélisation, parmi lesquels des scénarios alternatifs adaptés à chaque utilisateur sont sélectionnés. Tous ces éléments sont décrits ci-après.

2.1. Génération de scénarios par modélisation

2.1.1. Les modèles

L'outil ODACE s'appuie sur le couplage de deux catégories de modèles, des modèles IPSIM (Injury Profile SIMulator ; Aubertot et Robin, 2013) et le modèle de culture QualiTree (Lacroix *et al.*, 2024), pour prédire l'effet de pratiques agricoles et de facteurs environnementaux sur les performances des vergers. Les performances sont caractérisées par 15 indicateurs de services écosystémiques (Figure 1).

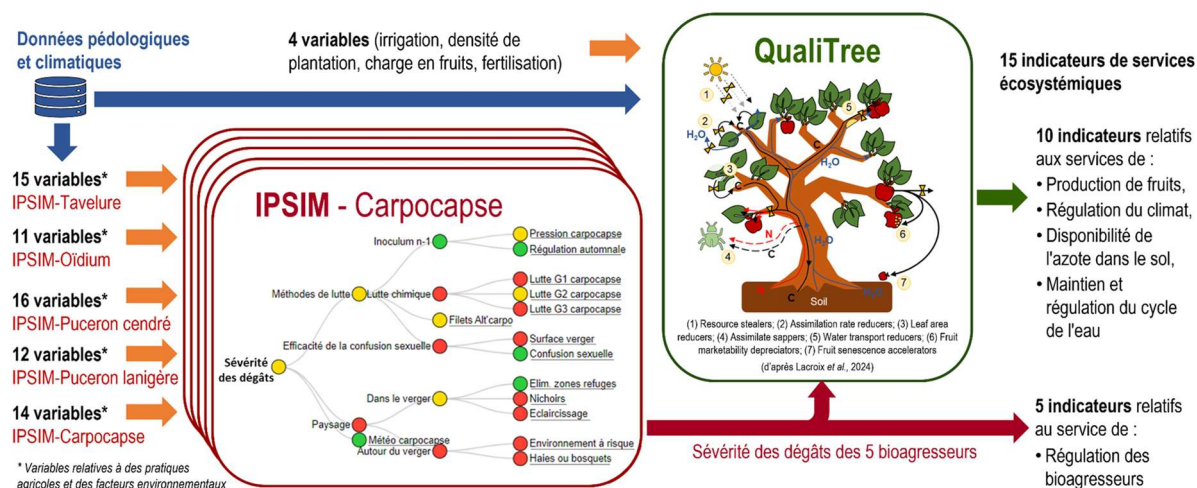


Figure 1 : Illustration du couplage des cinq modèles IPSIMs (un par bioagresseur) et du modèle QualiTree. Les 12 variables d'entrée (ou attributs) du modèle IPSIM-Carpocapse, donné en exemple, sont soulignées.

Les modèles IPSIM prédisent qualitativement, et de façon indépendante, la sévérité des dégâts de cinq bioagresseurs du pommier jugés les plus préoccupants (puceron cendré, puceron lanigère, carpocapse, oïdium, et tavelure), en fonction de pratiques agricoles et de facteurs environnementaux liés aux conditions climatiques, aux vergers voisins et à la pression des bioagresseurs l'année précédente. Chaque modèle (un par bioagresseur) est défini par des attributs de base (variables d'entrée du modèle, correspondant aux pratiques et facteurs précités), ses attributs agrégés, ainsi que par la hiérarchisation et les tables d'agrégation des attributs. Les modèles ont été développés en s'appuyant sur la littérature et l'expertise de chercheurs et de professionnels de la filière, évalués en confrontant les données simulées aux données observées (issues des bases de données Ecofruit, provenant du projet ODACE, et Epiphyt) et améliorés itérativement.

Le modèle QualiTree est un modèle de culture (sol-arbre-atmosphère), actuellement calibré pour la variété Golden et le porte greffe M9, qui prédit quantitativement 10 indicateurs relatifs à la production de



fruits, à la régulation du climat, à la disponibilité de l'azote dans le sol, et au maintien et à la régulation du cycle de l'eau, sous l'influence de pratiques culturales, des conditions pédologiques et climatiques et de la sévérité des dégâts des cinq bioagresseurs prédite par les modèles IPSIM. Il décrit de façon quantitative les processus liés au carbone, à l'azote et à l'eau dans l'arbre et dans le sol, ainsi que les altérations de l'état des organes ou de fonctions physiologiques de l'arbre par les bioagresseurs.

2.1.2. Les scénarios

Chaque scénario généré par modélisation est défini par une combinaison unique de variables correspondant aux pratiques agricoles et aux facteurs environnementaux considérés dans les modèles IPSIM et QualiTree, et il est associé aux 15 indicateurs de services écosystémiques simulés par ces modèles. Les simulations sont réalisées dans trois bassins de production de pommes (Ouest, Sud-Est et Sud-Ouest), à partir des données pédologiques et climatiques moyennes qui y ont été relevées. Le nombre de combinaisons possibles entre les modalités de toutes les variables considérées (11 à 16 par modèle IPSIM et quatre pour QualiTree; Figure 1), et non redondantes entre les modèles, amène à un nombre gigantesque de scénarios possibles (quelques milliers de milliards de scénarios) qu'il n'est pas envisageable de générer en raison de limites logicielles et matérielles.

Afin de réduire ce champ des possibles, plusieurs filtrages successifs ont été opérés. Ainsi, un premier filtrage a été opéré en fixant les variables les moins influentes vis-à-vis de la sévérité des dégâts des bioagresseurs prédite par les modèles IPSIM. Ces variables ont été identifiées par des méthodes de classification supervisée de forêts aléatoires (Breiman, 2001), et leurs valeurs ont été fixées à partir de données d'enquêtes réalisées auprès d'animateurs de groupes d'agriculteurs (réseau Ecophyto DEPHY Ferme) et de producteurs de pommes. Ensuite, un nouveau filtrage se fait en prenant en compte les informations renseignées par l'utilisateur : contexte de production, facteurs environnementaux, pratiques de conduite du verger immuables ou pratiques incompatibles avec son profil (cf. section 2.2). Enfin, un dernier filtrage se fait sur les seuils d'acceptabilité des critères de production (rendement commercialisable, teneur en sucres des fruits). Ces seuils ont été définis grâce aux mêmes enquêtes que mentionnées précédemment, ils peuvent varier entre les profils de production (cf. définition section 2.2). Il est à noter que malgré tous ces filtrages, le nombre théorique de scénarios possibles reste toujours colossal, et tous ces scénarios ne pourraient pas être stockés ni même générés intégralement (limites matérielles). Pour contourner cette difficulté, deux méthodes ont été développées (cf. section 2.3) pour sélectionner des scénarios alternatifs sans avoir à générer toute la palette de scénarios possibles.

2.2. Renseignement du contexte de production et du profil des utilisateurs

Les trois premiers onglets de l'interface sont des formulaires à renseigner par l'utilisateur (Figure 2).

L'onglet ① permet de renseigner le contexte de production, qui comprend le bassin de production (auquel sont associées des conditions pédologiques et climatiques moyennes), les caractéristiques du verger (surface, densité de plantation, variété et porte-greffe - à noter que l'outil ne fonctionne actuellement que pour la variété Golden et le porte-greffe M9), la présence de vergers voisins non protégés, les conditions de l'année précédente (pression des bioagresseurs et climat automnal), et le profil stratégique de production. Trois profils ont été définis : verger éco-responsable (production fruitière intégrée autorisant l'utilisation de PPP en dernier recours), agriculture biologique (AB) traditionnelle (correspondant au cahier des charges AB, autorisant l'utilisation de produits de biocontrôle) ou AB de rupture (aucun traitement). Ces profils ont été définis sur la base des enquêtes réalisées auprès d'acteurs de la filière (voir section 2.1.2). Les conditions de l'année précédente sont définies par défaut en fonction du bassin de production sélectionné, mais peuvent être modifiées par l'utilisateur.

Dans l'onglet ②, l'utilisateur renseigne ses préférences sur les pratiques de conduite du verger. Il a la possibilité de « fixer » certaines pratiques (indiqué par un cadenas rouge sur l'interface), c'est-à-dire qu'elles seront conservées en l'état dans les scénarios alternatifs proposés par l'outil, pour rendre compte

de ses contraintes ou préférences fortes. Les pratiques spécifiques à la lutte chimique sont renseignées dans l'onglet 3. Elles sont contraintes en fonction du profil de production sélectionné : aucun traitement chimique n'est possible en AB de rupture, tandis qu'ils sont limités à des traitements avec des produits de biocontrôle en AB traditionnelle. Pour les types éco-responsable et AB traditionnelle, l'outil présélectionne par défaut des pratiques sans aucun traitement chimique pour privilégier des scénarios alternatifs. L'utilisateur a toutefois la possibilité de modifier les pré-sélections faites par défaut.

The screenshot displays the ODACE application interface. On the left is a navigation menu with three numbered tabs: 1 (Contexte de production), 2 (Sélectionnez vos pratiques), and 3 (Sélectionnez vos pratiques chimiques). The main content area is divided into three sections:

- Section 1 (Contexte de production):** Titled 'Sélectionnez votre région', it features a map of France with three regions highlighted: Bassin Ouest (red), Bassin Sud-Est (blue), and Bassin Sud-Ouest (green). A legend on the right identifies these regions.
- Section 2 (Sélectionnez vos pratiques):** Contains various agricultural practice settings:
 - Quantité d'eau: Abondante, Limitée
 - Mode d'irrigation: Aspersion sur frondaison, Micro-jet, Goutte à goutte
 - Fertilisation: Importante, Limitée
 - Taille de l'arbre: Absente ou légère, Sévère
 - Pulvérisation d'urée: Non, Oui
- Section 3 (Sélectionnez vos pratiques chimiques):** Contains chemical control settings:
 - Lutte pré-flo. puc. cendré: Aucun traitement, Traitement bio ou allégé, Traitement complet
 - Lutte post-flo. puc. cendré: Aucun traitement, Traitement bio ou allégé, Traitement complet
 - Fongicide curatif: Absent / inefficace, Efficace

On the right side of the interface, there are three additional panels for describing the orchard and previous year:

- Décrivez vos pommiers:** Variété cultivée (Chantecler, Gala, Golden, Granny Smith, Pink Lady) and Porte-greffe (M7, M9, NAKB).
- Décrivez votre parcelle:** Surface de la parcelle (Petite, Moyenne, Grande) and Densité de plantation (arb/ha) (1500, 2000, 2250, 2500). It also includes Type de culture (Eco-responsable, AB traditionnelle, AB rupture) and Vergers voisins non protégés (Oui, Non).
- Décrivez l'année précédente:** Pression tavelure (Forte, Moyenne, Faible - Moyenne régionale) and Pression oïdium (Forte, Moyenne - Moyenne régionale, Faible). It also includes Pression puc. cendré (Forte, Moyenne - Moyenne régionale, Faible) and Pression puc. lanigère (Forte, Moyenne, Faible - Moyenne régionale). For September, it includes Pression carpocapse (Forte - Moyenne régionale, Moyenne, Faible) and weather conditions (Chaud et sec, Pluvieux).

Figure 2 : Illustration des trois premiers onglets de l'outil permettant à l'utilisateur de renseigner le contexte de production (onglet 1), et ses préférences et/ou contraintes sur les pratiques de conduite du verger utilisées (onglet 2, extrait), dont celles spécifiques à la lutte chimique (onglet 3, extrait).

2.3. Sélection de scénarios alternatifs selon deux méthodes : par exploration et par classes

Les quatrième et cinquième onglets de l'interface (Figures 3 et 4) permettent à l'utilisateur de rechercher des scénarios de pratiques alternatives aux PPP selon deux méthodes, **par exploration** et **par classes**, et de visualiser les résultats obtenus sous la forme de deux graphiques en radar. Le premier radar représente le scénario de référence (pratiques définies par l'utilisateur) et les scénarios alternatifs proposés par l'outil. Seules les pratiques qui divergent du scénario de référence y sont représentées. Le second radar représente les performances des scénarios (indicateurs de services écosystémiques, hormis ceux concernant la régulation des bioagresseurs). En complément de ces graphiques, l'ensemble des pratiques et des indicateurs de performances, ainsi que les facteurs environnementaux considérés, sont rappelés sous forme de tableaux pour chaque scénario.



La recherche de scénarios alternatifs consiste à balayer l'ensemble des scénarios possibles et adaptés aux contraintes de l'utilisateur. Etant donné le très grand nombre de scénarios possibles, et l'impossibilité logicielle et matérielle de tous les générer, la recherche exhaustive du meilleur scénario est donc illusoire.

La méthode par exploration utilise un algorithme d'optimisation combinatoire sous contraintes pour améliorer un indicateur de performance cible parmi quatre indicateurs clés (rendement commercialisable, teneur en sucre ou carbone séquestré - à maximiser, ou drainage - à minimiser), tout en limitant l'ajout de pratiques contraignantes d'un point de vue technique ou financier par rapport au scénario de référence. Cette stratégie se traduit par la recherche de scénarios alternatifs relativement proches du scénario de référence de l'utilisateur. Trois scénarios alternatifs vont être proposés par défaut, mais l'utilisateur peut en modifier le nombre. Comme le nombre de combinaisons à explorer est très important, chaque nouvelle recherche peut aboutir à des propositions de scénarios différents.

La méthode par classes nécessite un prétraitement utilisant un algorithme de classification non supervisé, permettant de regrouper les scénarios alternatifs en classes de performances, sur la base des quatre indicateurs clés (cf ci-dessus). Au sein de chaque classe identifiée, on sélectionne trois scénarios ayant les mêmes performances (représentatifs de la classe) mais présentant des pratiques contrastées : le moins de changements (proximité avec les pratiques actuelles), le recours à la biodiversité (pratiques s'appuyant sur la régulation naturelle), et le moins de pratiques contraignantes (peu d'investissement). L'intuition derrière cette méthode est de montrer à l'utilisateur que, pour des performances similaires, il est possible de mobiliser des combinaisons de pratiques contrastées et potentiellement plus vertueuses. L'utilisateur peut choisir la classe de performances à afficher et visualiser les trois scénarios associés.

3. Résultats : exemple d'application de l'outil sur un cas d'étude

3.1. Description du contexte de production

Le cas d'étude porte sur un producteur de pommes Golden dans le sud-est de la France, en production fruitière intégrée. Ce producteur souhaite réduire l'utilisation de PPP dans un verger de 10 ha, avec une densité de plantation de 2000 arbres/ha. Le puceron cendré et le carpocapse sont problématiques; ce producteur est également soumis à des pressions moyennes de tavelure et d'oïdium. Le verger est équipé de goutte-à-goutte, les quantités d'eau et de fertilisants apportées assurent un confort optimal des arbres. Les pommiers sont éclaircis et taillés de façon modérée. Ce verger est entouré de haies de cyprès, et l'inter-rang est enherbé et fauché régulièrement. Pour lutter contre le puceron cendré, le producteur utilise des PPP en préfloraison et en post-floraison. Il utilise la confusion sexuelle pour lutter contre le carpocapse, et des produits de biocontrôle en complément (*Bacillus thuringiensis* et carpovirusine), qui sont appliqués sur les trois générations du papillon. Contre l'oïdium, il réalise des traitements préventifs systématiques à base de soufre, qu'il peut aussi utiliser en curatif si la pression est trop forte. Pour lutter contre la tavelure, il réalise des traitements à base de PPP en prévision des infections (traitement préventif) et lorsque les dégâts sont visibles (traitement curatif). A l'automne, il réalise une pulvérisation d'urée pour accélérer la dégradation de la litière foliaire et réduire ainsi l'inoculum de tavelure.

Le producteur renseigne toutes ces informations dans l'outil et s'identifie comme un profil 'éco-responsable'. Il lance alors une recherche selon les deux méthodes proposées (par exploration et par classe). Les résultats obtenus sont présentés ci-après.

3.2. Scénarios générés avec la méthode par exploration

Pour cette recherche, l'indicateur cible défini par l'utilisateur est le rendement commercialisable. Les trois scénarios alternatifs obtenus sont présentés en comparaison à celui de référence sur la Figure 3.

Concernant la gestion des pucerons, tous les scénarios alternatifs proposent de supprimer les traitements contre le puceron cendré, voire de supprimer les traitements contre le puceron lanigère (**scénario 3**). En

remplacement, les scénarios proposent de favoriser la régulation naturelle par un enherbement du rang et de l'inter-rang pour augmenter la présence d'auxiliaires (**scénario 2**), ou par l'installation d'abris à forficules (**scénario 3**) qui sont des prédateurs des pucerons. Pour lutter contre le carpocapse, les trois scénarios alternatifs proposent des pratiques supplémentaires à l'existant, à savoir l'élimination des zones de refuge du carpocapse (arbres isolés, vergers abandonnés) et la mise en place de nichoirs. Concernant la gestion des maladies, tous les scénarios alternatifs proposent de maintenir les traitements préventifs de fongicides mais de supprimer la destruction de la litière foliaire et l'application d'urée, ainsi que les fongicides en curatif pour certains. Seul le **scénario 3** propose de les maintenir, mais de limiter en contrepartie les traitements préventifs aux pics de projection de spores. A la place des fongicides, le **scénario 1** propose de favoriser l'aération du couvert en limitant les quantités d'eau apportées et en pratiquant une taille en vert plus sévère.

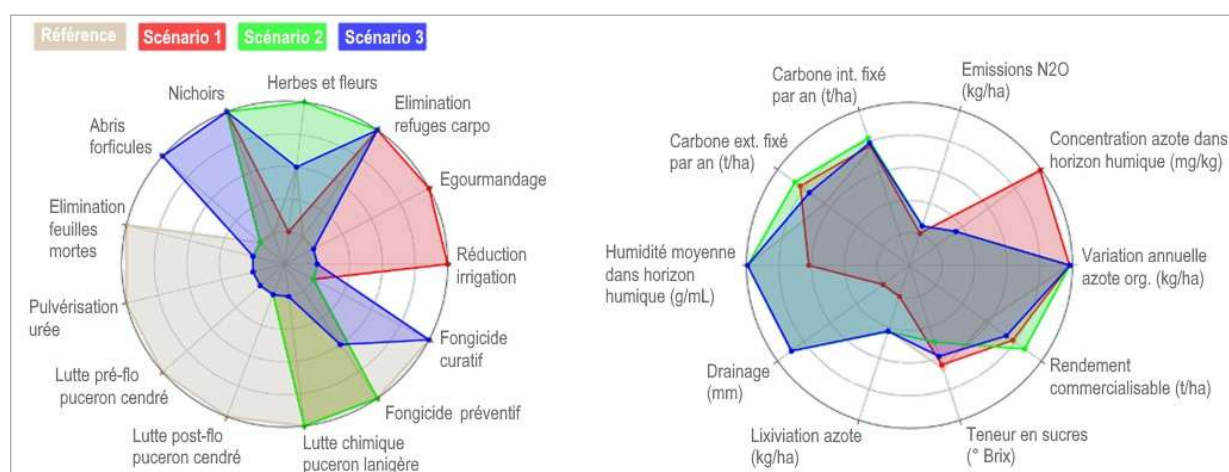


Figure 3 : Illustration des trois scénarios alternatifs générés par la méthode par exploration (en rouge, vert et bleu) et du scénario de référence (en marron) sur deux graphiques en radar, représentant les pratiques (à gauche) et les performances (à droite). Seules les pratiques qui divergent du scénario de référence sont représentées.

Les performances des différents scénarios restent inchangées en ce qui concerne les indicateurs relatifs à la variation annuelle de l'azote organique dans le sol, aux émissions de N_2O et à la séquestration du carbone int. (incluant le carbone fixé dans les fruits tombés prématurément à cause des bioagresseurs). Les scénarios alternatifs proposent tous de réduire le nombre de traitements phytosanitaires, tout en améliorant le rendement commercialisable et la séquestration du carbone ext. (excluant le carbone fixé dans les fruits tombés) car ils prédisent moins d'attaques sur les fruits dues au carpocapse (Tableau 1). La réduction des quantités d'eau apportées dans le **scénario 1** permet de réduire le drainage et la lixiviation de l'azote, et induit une plus faible humidité dans l'horizon humique. Avec la proposition du **scénario 2** d'enherber le rang et l'inter-rang, il y a un risque d'augmenter la compétition avec les pommiers, et possiblement de réduire la teneur en sucres des fruits.

Tableau 1 : Synthèse de la sévérité des dégâts des cinq bioagresseurs pour le scénario de référence et pour les trois scénarios alternatifs générés par la méthode par exploration. Les cases sont surlignées en jaune quand l'indicateur de performance du scénario alternatif diffère de celui de la référence.

Bioagresseur	Référence	Scénario 1	Scénario 2	Scénario 3
Carpocapse	Moyenne	Faible	Faible	Faible
Puceron cendré	Moyenne	Moyenne	Moyenne	Moyenne
Puceron lanigère	Moyenne	Faible	Faible	Faible
Oïdium	Moyenne	Moyenne	Moyenne	Moyenne
Tavelure	Faible	Faible	Faible	Faible



3.3. Scénarios générés avec la méthode par classes

Pour cette recherche, l'utilisateur a choisi d'afficher la classe de scénarios qui maximisent le rendement commercialisable. Les trois scénarios alternatifs obtenus pour cette classe sont présentés en comparaison à celui de référence sur la Figure 4. Les scénarios alternatifs permettent de répondre à un sous-objectif: minimiser les changements de pratiques (**proximité**), privilégier les pratiques favorisant la régulation naturelle (**biodiversité**), et favoriser l'absence de pratiques contraignantes (**peu d'investissement**).

Concernant la gestion des pucerons, le scénario **biodiversité** propose de supprimer tous les traitements chimiques contre les pucerons, et d'installer des abris à forficules pour augmenter la prédation. Le scénario **peu d'investissement** propose de maintenir le traitement contre les pucerons lanigères, et de supprimer les autres traitements. Pour lutter contre le carpocapse, tous les scénarios alternatifs proposent d'éliminer les zones de refuge du carpocapse et de mettre en place des nichoirs. Concernant la gestion des maladies, les scénarios alternatifs ne proposent pas de changements, à part d'appliquer les fongicides en préventif seulement sur les pics de projection de spores (scénario **peu d'investissement**).

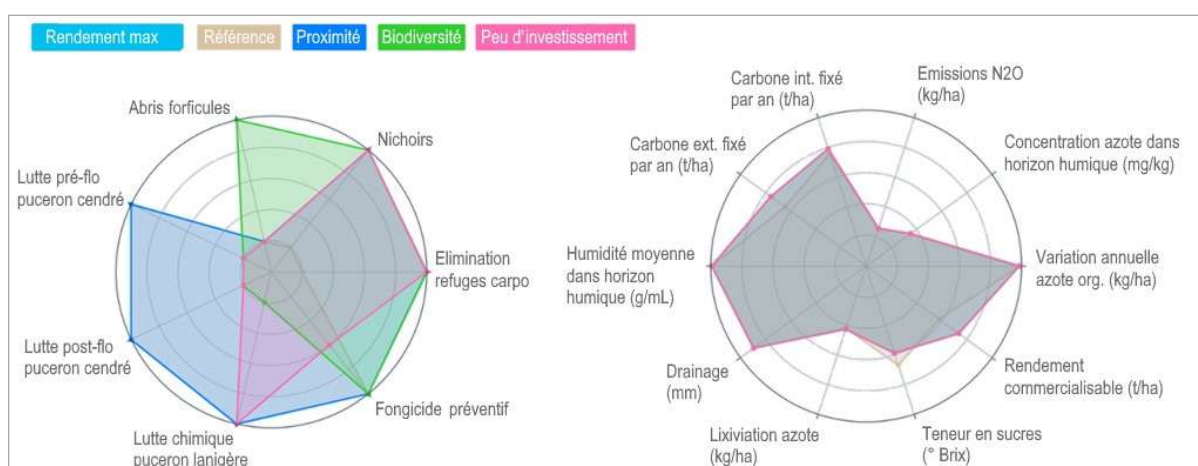


Figure 4 : Illustration des trois scénarios alternatifs générés par la méthode par classe (en bleu, vert, et rose) et du scénario de référence (en marron), représentant les pratiques (radar de gauche) et les indicateurs de performances (radar de droite). Seules les pratiques qui divergent du scénario de référence sont représentées.

Les performances des scénarios restent inchangées pour la grande majorité des indicateurs. Les seules différences concernent le rendement commercialisable et la séquestration du carbone ext. (excluant le carbone fixé dans les fruits tombés), qui sont améliorés avec les trois scénarios alternatifs. Les scénarios **biodiversité** et **peu d'investissement** semblent être plus intéressants car ils permettent de réduire l'application de traitements phytosanitaires tout en réduisant les attaques dues au carpocapse et au puceron lanigère (Tableau 2), alors que le scénario de **proximité** maintient tous les traitements.

Tableau 2 : Synthèse de la sévérité des dégâts des cinq bioagresseurs pour le scénario de référence et pour les trois scénarios alternatifs générés par la méthode par classe. Les cases sont surlignées en jaune quand l'indicateur de performance du scénario alternatif diffère de celui de la référence.

Bioagresseur	Référence	Proximité	Biodiversité	Peu d'investissement
Carpocapse	Moyenne	Faible	Faible	Faible
Puceron cendré	Moyenne	Moyenne	Moyenne	Moyenne
Puceron lanigère	Moyenne	Faible	Faible	Faible
Oïdium	Moyenne	Moyenne	Moyenne	Moyenne
Tavelure	Aucune	Aucune	Aucune	Aucune



4. Discussion

L'outil ODACE constitue un **outil d'accompagnement des acteurs de la filière pomme** (conseillers, animateurs de réseaux, formateurs et apprenants) souhaitant s'engager dans une réduction de l'usage des PPP. Il est facilement appropriable grâce à son interface ergonomique et interactive. A l'aide de différents onglets de l'interface, l'utilisateur peut facilement préciser son contexte de production, ses contraintes et ses préférences, de façon à ce que les scénarios alternatifs proposés répondent au mieux à sa situation et ses attentes. L'intérêt de l'outil est aussi de proposer à l'utilisateur différentes méthodes et options de recherche, ce qui lui laisse la possibilité de comparer plusieurs scénarios alternatifs grâce à des représentations visuelles synthétiques et ainsi faire ses propres choix. L'analyse du cas d'étude montre que la méthode par classes, visant à explorer des scénarios avec des sous-objectifs contrastés, permet d'obtenir des performances similaires avec des combinaisons de pratiques différentes, ce qui donne à l'utilisateur plus de liberté dans ces choix de pratiques à favoriser. Le cas d'étude a montré qu'il était possible de réduire l'utilisation de PPP en positionnant mieux les traitements ou en les substituant par des pratiques alternatives sans compromettre les performances du verger. La mise en œuvre de ces pratiques alternatives peut toutefois demander davantage de surveillance ou de technicité (Zavagli *et al.*, 2018). Par exemple, l'application de fongicides en préventif seulement sur les pics de projection de spores permet de réduire le nombre de traitements par rapport à des traitements systématiques, mais cela nécessite l'utilisation d'outil de prédiction des risques d'infections épidémiologiques des végétaux et/ou une bonne connaissance des maladies.

L'outil offre également un **support d'échange entre les professionnels de la filière et les chercheurs autour de la transition agroécologique**. Au-delà des services de production de fruits et de régulation des bioagresseurs, l'outil fournit d'autres indicateurs de services écosystémiques en lien avec la régulation du climat, la fertilité des sols, et la régulation du cycle de l'eau qui sont, au regard des enquêtes réalisées, encore peu considérés par les agriculteurs (car non valorisables économiquement). L'outil ODACE peut en ce sens constituer un moyen de sensibilisation à l'impact de leurs pratiques sur l'environnement. Les modèles IPSIM et QualiTree mobilisés par l'outil peuvent aussi être utilisés indépendamment, notamment pour mieux appréhender les interactions entre pratiques agricoles, bioagresseurs et fonctionnement de la plante. En particulier, les modèles IPSIM sont facilement mobilisables par les professionnels grâce à une interface interactive R-Shiny inspirée de celle développée pour IPSIM-Chayote (Deguine *et al.*, 2021). Elle permet à un utilisateur de visualiser l'impact de la modification d'une pratique individuelle ou d'une combinaison de pratiques sur la sévérité des dégâts d'un bioagresseur, et peut l'amener ainsi à modifier ses pratiques. Le modèle QualiTree pourrait servir à tester l'impact de différents schémas d'infestation/infection spatiale et temporelle des bioagresseurs, ou à évaluer l'impact de bioagresseurs dans des conditions de stress abiotiques (Lacroix *et al.*, 2024). Son utilisation reste cependant limitée à un public scientifique initié et nécessite une vulgarisation auprès des professionnels. Par ailleurs, alors que les scénarios ont été simulés sur des données climatiques « moyennes » d'un bassin, les modèles offrent la possibilité de générer des scénarios sous différentes projections de changement climatique (Vercambre *et al.*, 2024).

L'outil ODACE présente toutefois **certaines limites, en grande partie liées aux données sur lesquelles les modèles s'appuient pour simuler les scénarios**. Que ce soit pour les modèles IPSIM (dégâts des bioagresseurs) ou le modèle QualiTree (impact des dégâts sur le fonctionnement de l'arbre), leur développement s'est heurté à des données insuffisantes, souvent lacunaires, voire inadéquates vis-à-vis des besoins de modélisation. Par exemple, il y a peu de données concernant des contextes de dégâts de bioagresseurs modérés ou forts, et encore moins avec des attaques multiples. Il y a aussi un manque de connaissances et de données pour identifier, et surtout quantifier, les mécanismes physiologiques affectés par certains bioagresseurs. Cela ne permet pas de paramétrer les modèles sur toute la gamme de dégâts possible, et peut réduire leur qualité prédictive. Par ailleurs, l'impact de certaines pratiques innovantes (par exemple la défoliation des arbres pour limiter les attaques de pucerons cendrés) sur le



fonctionnement de l'arbre (mise en réserve ...) reste encore peu étudié. Aussi, il peut encore exister des désaccords entre experts quant à l'efficacité de certaines techniques, et certains choix formalisés dans les modèles ne font pas l'unanimité des utilisateurs et/ou des experts qui ont contribué à leur développement. Mais ces discussions participent à la réflexion, et à une meilleure confrontation/compréhension des connaissances des différents acteurs. Même si l'évaluation des modèles IPSIM montre certaines limites, ils prédisent qualitativement des niveaux de dégâts qui correspondent à ce qui est attendu par les experts de terrain. De même, les gammes de valeur des indicateurs simulés par le modèle QualiTree sont cohérentes avec celles trouvées dans la littérature, dans les rares travaux où elles étaient disponibles ou comparables.

Des **perspectives d'amélioration de l'outil** ont par ailleurs été identifiées. Une première voie d'amélioration serait de calibrer le modèle QualiTree pour d'autres variétés et porte-greffes afin de rendre l'outil plus générique. Une seconde voie serait de mieux prendre en compte dans les modèles les interactions entre les bioagresseurs d'une part, et leurs effets différés et pluriannuels d'autre part. Bien que les interactions entre bioagresseurs soient généralement connues (Hatcher, 1995), les références concernant ceux du pommier manquent, à quelques exceptions près. Par exemple, des associations positives entre la présence d'oïdium et l'abondance des acariens rouges auraient été trouvées sur les pommiers (Reding *et al.*, 2001). Pour le moment, les simulations ne permettent pas de prendre en compte les effets différés des bioagresseurs, comme l'impact des infestations de pucerons sur la floraison de l'année suivante (Morel *et al.*, 2011). Des recherches supplémentaires sont nécessaires pour documenter ou étudier ces interactions et effets, et ainsi améliorer la fiabilité des modèles. Une dernière voie d'amélioration serait d'élargir les indicateurs de performances fournis par l'outil, avec la prise en compte de critères de production (fermeté et coloration des fruits) et économiques (coûts, temps de travail, marges). L'outil pourrait aussi intégrer un indicateur synthétique du niveau d'usage des PPP (IFT ou proxy). Ces améliorations permettraient de mieux évaluer la durabilité des stratégies dans l'outil. D'autres améliorations ont été évoquées avec les experts par rapport à l'outil en lui-même, avec notamment l'idée de le rendre encore plus interactif. En laissant le choix à l'utilisateur de fixer ses propres seuils vis-à-vis des indicateurs de performances (dégâts de bioagresseurs, rendement, etc.), l'outil permettrait de faire des recherches plus ciblées et proposerait des scénarios plus en adéquation avec les objectifs propres de l'utilisateur. Il est prévu de tester davantage l'outil dans des réseaux de la filière pomme, au travers de groupes de travail qui seront organisés dans le cadre d'un futur projet et/ou de projets étudiants (collaborations avec l'école d'ingénieurs de Purpan et l'ISARA).

Dans un contexte changeant, l'outil se doit d'être évolutif. En effet, les connaissances scientifiques et expertes, ainsi que les pratiques agricoles et la réglementation évoluent au fil du temps, ce qui nécessite que les bases de données et les modèles soient régulièrement mis à jour. Par exemple, les autorisations de mise en marché de certains produits ont changé depuis le développement de l'outil, ce qui amène à un décalage entre les propositions de l'outil et les contraintes réglementaires en vigueur. De même, de nouveaux bioagresseurs deviennent problématiques et ne sont pour le moment pas pris en compte dans l'outil, comme des cortèges de maladies secondaires (black rot, *Colletotrichum*) qui doivent être gérées en même temps que la tavelure, ou de nouveaux bioagresseurs émergents (punaise diabolique). Des pratiques alternatives proposées par l'outil peuvent également être favorables à des bioagresseurs qui ne sont pas encore considérés dans l'outil. Par exemple, l'enherbement total du verger peut augmenter le risque d'accroître les populations de campagnols. Il serait donc utile de compléter les modèles IPSIM actuels de l'outil.

5. Conclusion

Par une approche de modélisation, ce travail a permis de développer un outil pour accompagner les professionnels de la filière dans leur réflexion sur la mise en place de stratégies de réduction de l'usage des PPP. Cet outil interactif prend en compte le contexte de production, les objectifs et les préférences



des utilisateurs, pour proposer des scénarios adaptés à leurs situations par deux méthodes d'optimisation combinatoire et de classification non supervisée. Il est important de maintenir des liens étroits entre chercheurs et utilisateurs pour faire évoluer les modèles et l'outil en adéquation avec les retours des utilisateurs et les attentes de la profession, et en intégrant les nouvelles connaissances scientifiques et expertes pour s'affranchir de certaines limites actuelles. En outre, il est primordial de tester l'outil à une échelle beaucoup plus large pour l'améliorer. Ce travail constitue une preuve de concept de la démarche qui pourrait être transposée à d'autres espèces fruitières – à condition toutefois d'avoir des modèles déjà développés ou suffisamment de données pour les développer, ce qui constitue la principale limite pour le transfert de la démarche.

Déclaration sur la disponibilité des données et des modèles

Les données, modèles et outils évoqués dans cet article sont accessibles sur demande auprès de l'auteur de correspondance de l'article. L'outil ODACE sera disponible sur la plateforme INRAE SK8 des applications R shiny, accompagné de l'application dédiée aux IPSIMs.

Déclaration relative à l'Intelligence artificielle (IA) générative et aux technologies assistées par l'IA

Les auteurs n'ont pas utilisé de technologies assistées par IA pour la rédaction.

Contributions des auteurs

Acquisition de financements : MMM ; Administration du projet : MMM ; Méthodologie : JB, IG, JNA, FL, FO, MHR, AR, GV, MMM ; Analyse formelle : JB, IG ; Logiciels : FO, PV ; Présentation visuelle : FO ; Supervision : JB, BG, FL, AR, MMM ; Validation : JB, IG, GV ; Rédaction du manuscrit initial : JB, IG ; Relecture : Tous les co-auteurs.

Déclaration d'intérêt

Les auteurs déclarent ne pas travailler, conseiller, posséder de parts ou recevoir de fonds d'une organisation pouvant tirer profit de cet article, et ne déclarent aucune autre affiliation que celles citées en début d'article.

Remerciements

Les auteurs remercient toutes et tous les collègues impliqué(e)s dans le projet (P. Blanc, V. Gallia, S. Drusch, M. Génard, D. Bevacqua, C. Lavigne, C. Mouiren, N. Sautereau, B. Rosiès). Un remerciement chaleureux à nos stagiaires et contractuels ayant contribué à ce travail (C. Monot, O. Lacroix, D. Ndala Landou, A. Palloie, E. Barthélémy, S. Lavaud, Y. Thorel, C. Faguard, V. Mouche, A. Chemier, M. Bolot, T. Cochez) et aux gestionnaires D. Vailhen, V. Amat, et F. Voisin pour leur appui durant tout le projet.

Déclaration de soutien financier

Action pilotée par les Ministères de l'Agriculture et de la Souveraineté Alimentaire, de la Transition écologique et de la Cohésion des Territoires, de la Santé et de la Prévention et de l'Enseignement supérieur et de la Recherche, avec l'appui financier de l'OFB, dans le cadre de l'APR « Produits phytopharmaceutiques : de l'exposition aux impacts sur la santé humaine et les écosystèmes », grâce aux crédits attribués au financement du plan Écophyto II+.

Références bibliographiques

Agreste, 2021. Enquête Pratiques phytosanitaires en arboriculture en 2018. IFT et nombre de traitements. CHIFFRES ET DONNÉES, mai 2021, n°8.

Alaphilippe A., Angevin F., Guérin A., Guillermin P., Velu A., et al., 2017. DEX-IFruits, un outil d'évaluation multicritère des systèmes de production de fruits : d'un modèle de recherche à un outil terrain co-construit. *Innovations Agronomiques* 59, 205-212.



Aubertot J.N., Robin, M.-H., 2013. Injury Profile SIMulator, a qualitative aggregative modelling framework to predict crop injury profile as a function of cropping practices, and the abiotic and biotic environment. I. Conceptual bases. *Plos One* 8 (9).

Breiman L., 2001. Random Forests, *Machine Learning*, vol. 45, no 1, p. 5–32.

Chang W., Cheng J., Allaire J., Sievert C., Schloerke B., Xie Y., Allen J., McPherson J., Dipert A., Borges B. (2024). shiny: Web Application Framework for R. R package version 1.10.0, <https://CRAN.R-project.org/package=shiny>.

Deguine J-P., Robin M-H., Corrales D. C., Vedy-Zecchini M-A, Doizy A., Chiroleu F., Quesnel G., Paitard I., Bohanec M., Aubertot J-N., 2021. Qualitative modeling of fruit fly injuries on chayote in Réunion: Development and transfer to users. *Crop Protection*, 139:105367.

Hatcher P.E., 1995. Three-way interactions between plant pathogenic fungi, herbivorous insects and their host plants. *Biological Reviews* 70, 639–694.

Inserm, 2021. Pesticides et effets sur la santé : Nouvelles données. Collection Expertise collective. Montrouge : EDP Sciences.

Lacroix O., Lescourret F., Génard M., Memah M-M., Vercambre G., Valsesia P., Bevacqua D., Grechi I., 2024. Modeling the effect of multiple pests on ecosystem services provided by fruit crops: Application to apple. *Agricultural Systems* 213, 103808.

Ould-Sidi M.-M., Lescourret F., 2011. Model-based design of integrated production systems: a review. *Agronomy and Sustainable Development* 31, 571–588.

Mamy L., Pesce S., Sanchez W., Amichot M., Artigas J., et al., 2022. Impacts des produits phytopharmaceutiques sur la biodiversité et les services écosystémiques. Rapport de l'expertise scientifique collective. [Rapport de recherche] INRAE, IFREMER, 1408 pp.

Morel K., Cœur d'Acier A., Defrance H., Simon S., 2011. Le puceron cendré du pommier: Mieux connaître son vol d'automne pour mieux le maîtriser au printemps. *PHYTOMA - La Défense des Végétaux* 644, 49-52.

R Core Team, 2025. R: a Language and Environment for Statistical Computing (Vienna, Austria: R Foundation for Statistical Computing), <https://www.R-project.org/>.

Reding M.E., Alston D.G., Thomson S.V., Stark A.V., 2001. Association of powdery mildew and spider mite populations in apple and cherry orchards. *Agriculture Ecosystems & Environment* 84, 177–186.

Ricci P., Bui S., Lamine C., 2011. Repenser la protection des cultures : Innovations et transitions. Éducagri éditions, 258 pp.

Vercambre, G., Mirás-Avalos, J. M., Juillion, P., Moradzadeh, et al. 2024. Analyzing the impacts of climate change on ecosystem services provided by apple orchards in Southeast France using a process-based model. *Journal of Environmental Management*, 370, 122470.

Zavagli F., Alison B., Ballion S., Bellevaux C., Favareille J., Giraud M., Le Berre F., Lesniak V., Sagnes J.L., Verpont F., 2018. Réduire l'emploi des produits phytosanitaires en verger de pommier. Les enseignements du réseau national EXPE Ecophyto Pomme. *Innovations Agronomiques* 70, 55-72.



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.