

RAPPORT SCIENTIFIQUE



Outil d'évaluation et de Dialogue entre acteurs et chercheurs, pour Accompagner la conCEption de solutions de protection des plantes dans le contexte arboricole (ODACE)

« Durabilité des systèmes de productions agricoles
alternatifs évitant ou limitant l'utilisation des produits
phytopharmaceutiques »

Rapport final V3 [M-M. MEMAH]

Date de la version du rapport : 11/03/ 2025

*Julie Borg, Jean-Noël Aubertot, Daniele Bevacqua, Philippe, Pascal Borioli,
Stéphanie Drusch, Valérie Gallia, Bertrand Gauffre, Hélène Gautier, Michel Génard,
Pierre Franck, Baptiste Labeyrie, Claire Lavigne, Françoise Lescourret, Vincent
Mercier, Christophe Mouiren, Frédéric Normand, Marie-Hélène Robin, Antoine
Rolland, Julien Ruesch, Natacha Sautereau, Pierre Valsesia, Gilles Vercambre,
Isabelle Grechi.*

UR PSH, 228 route de l'aérodrome, CS 40 509 - Domaine Saint Paul, Site Agroparc,
84914 Avignon Cedex 9, France

Mohamed-Mahmoud MEMAH (mohamed-mahmoud.memah@inrae.fr)

Action pilotée par les Ministères chargés de la Transition Ecologique et de la Cohésion des Territoires (MTECT), de l'Agriculture et de la Souveraineté Alimentaire (MASA), du Travail, de la Santé et des Solidarités (MTSS), et de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche (MESR), avec l'appui financier de l'Office Français pour la Biodiversité (OFB), par les crédits issus de la redevance pour pollutions diffuses attribués au plan Écophyto II+

1. Contexte, objectifs et démarche générale

Le projet ODACE visait à accompagner les acteurs dans leur réflexion sur la mise en place de stratégies de réduction de l'usage des produits phytosanitaires en vergers. Cette réduction nécessite une maîtrise durable des bioagresseurs (BAs) des plantes s'appuyant conjointement sur plusieurs leviers de contrôle alternatifs, ayant chacun une efficacité partielle : leviers culturels, biodiversité planifiée, biopesticides, barrières physiques, etc. L'évolution des attentes de la société et des filières implique de considérer non seulement les performances agronomiques et économiques des agroécosystèmes mais aussi les impacts sur l'environnement, l'équité sociale, et la santé humaine. En outre, les acteurs de la transition agroécologique ont des préférences contrastées et ont besoin d'éléments adaptés à leurs points de vue pour évaluer des stratégies de maîtrise des BAs. Pour la mise au point de ces stratégies, il est donc nécessaire d'adopter une approche intégrée qui considère de multiples performances et de multiples acteurs. Un autre défi est d'évaluer des stratégies sur la base de connaissances éparses et partielles issues de la recherche et des dires d'experts. La modélisation **pourrait** être la clé de voûte pour relever certains défis de l'évaluation de la durabilité, **en aidant à évaluer/concevoir des stratégies**, dont certaines sont aujourd'hui complètement virtuelles, dans des situations hypothétiques et incertaines telles que des projections climatiques.

Malgré leur succès et large adoption, les outils existants d'évaluation de la durabilité, souvent basés sur des indicateurs environnementaux (ACV [1], empreinte écologique [2]) ou des arbres de décision (MASC [3,4], DEXiPM [5,6]), montrent certaines limites : lourdeur des démarches, difficulté d'intégration avec des algorithmes d'optimisation et faible prise en compte des interactions entre leviers. Face à ces limites, nous avons proposé de développer une approche complémentaire se positionnant en amont de toute démarche de conception, en capitalisant les acquis des outils existants et surmontant certaines de leurs limites. Les hypothèses sous-jacentes à notre travail sont les suivantes :

- Il est stratégique pour l'évaluation en amont des innovations de savoir combiner des **connaissances qualitatives** et des **données quantitatives** (comme suggéré par Messéan et al [6]), telles que fournies par des dires d'experts et des modèles de culture.
- Il est très important pour cette démarche de conception de disposer d'un cadre de modélisation capable d'intégrer la régulation de **plusieurs BAs** par la combinaison de **différents leviers**.
- Ce cadre de modélisation pourrait être utilisé pour évaluer des stratégies de production - combinaisons des leviers de culture et de contrôle de BAs, selon **plusieurs critères de performance** quantitatifs et qualitatifs,
- Une approche générative assistée par ce cadre de modélisation pourrait **explorer de nombreuses stratégies candidates, évaluées et améliorées itérativement** sur la base des préférences et objectifs de chaque profil d'acteur.
- Des méthodes d'aide à la décision multicritère et d'élicitation de préférences pourraient être mises en œuvre pour **apprendre le raisonnement d'un acteur** qui le conduira à choisir un scénario plutôt qu'un autre.
- Un système de recommandation ou mécanisme d'inférence pourrait aider à **identifier les scénarios les plus adaptés et prometteurs** pour l'utilisateur.

Par cette approche de modélisation, le projet visait donc à proposer un **outil ergonomique pour accompagner les utilisateurs (conseillers, animateurs de**

réseaux, formateurs et apprenants) dans leurs démarches de co-conception de stratégies de production intégrant, dans des cadres existants (AB) ou nouveaux (0 phytos, ...), des leviers alternatifs aux pesticides. Les scénarios candidats obtenus illustreront la démarche de co-conception et ouvriront des perspectives pour la transition agroécologique.

Le projet était structuré en une tâche de coordination (T0) et quatre tâches de recherche (1-4): la **tâche 1** devait collecter, trier, et mettre en forme des données disponibles et accessibles pour concevoir et alimenter une base de données mobilisables par les autres tâches. La **tâche 2** visait à articuler des modèles de culture fruitière prédisant la production et d'autres services écosystémiques, et des modèles de dégâts de BAs multiples répondant à des leviers variés. La **tâche 3** devait définir des profils d'acteurs correspondant à des stratégies de production, des critères de performance et aider à sélectionner des scénarios innovants. La **tâche 4** était dédiée au développement de l'outil de co-conception proprement dit. Pour cela, elle doit mobiliser la BDD de la tâche 1, les modèles de la tâche 2, et les profils d'acteurs définis dans la tâche 3.

2. Actions et résultats de recherche obtenus par tâche

Nous présentons ci-après quelques-uns des éléments méthodologiques et résultats majeurs obtenus par tâche. Quelques figures illustrant certains résultats seront données en annexe.

Tâche 1 : Collecte, tri et mise en forme des données et connaissances expertes – coord. Julien Ruesch (CTIFL) et Bertrand Gauffre (INRAE-PSH)

Cette tâche avait pour objectif de collecter, de trier et de mettre en forme des données d'expérimentations disponibles et accessibles pour concevoir et alimenter une base de données mobilisable par les autres tâches. Les données collectées concernaient les interactions arbre – BAs – pratiques, les performances des vergers, et les conditions dans lesquelles celles-ci ont été observées. Les données relatives aux BAs incluent les dégâts et leurs impacts sur les arbres. Celles sur les pratiques culturales incluent les calendriers d'interventions manuelles et mécaniques y compris les leviers de contrôle alternatifs ciblés par le projet, l'utilisation d'intrants ainsi que les calendriers d'interventions phytosanitaires.

Les performances agronomiques et économiques étaient aussi visées.

Pour l'exploitation de toutes ces données, Il était prévu initialement de développer une BDD Access mais vu l'ambition du projet, la diversité des données visées, la complexité des requêtes envisagées, la taille et l'évolution projetée de la base, et les limites d'Access ; nous avons décidé de concevoir une BDD PostGRESQL.

La réalisation de cette tâche comprenait les actions suivantes :

La conception de la base de données

La production du diagramme entité-relation de la BDD a été réalisée avec le logiciel pgModeler qui est dédié à la conception de BDD sous PostGRESQL. Le **diagramme entité-relation** de la BDD est réalisé avec le logiciel PGModeler. Il contient 4 **schémas** : *Commun* qui décrit les vergers et leur mode de culture, *Ecophysio* qui contient des mesures écophysiologiques associées à une date donnée, pour un niveau d'échelle donné, *Performance* décrit les performances globales du verger et

observations à la récolte, et BAA (*pour BioAgresseurs et Auxiliaires*) contient des données d'abondance et de dégâts de BAs et des auxiliaires. Chaque schéma contient des tables reliées entre elles au sein du schéma et/ou entre plusieurs **schémas** [7]. La production de ce **diagramme entité-relation** a demandé plusieurs réunions et échanges avec les collègues impliqués dans le projet. L'objectif était de concevoir une BDD très ambitieuse et générique, qui ne se limite pas aux seuls objectifs du projet Odace et qui pourrait ainsi perdurer et être alimentée par de nouvelles données expérimentales et intégrer facilement d'autres espèces.

La collecte des données

Pour la réalisation de cette action, nous avons visé et contacté un large panel de personnes-ressources pour récupérer le maximum de données disponibles possible pour les trois espèces visées (pommier, pêcher, manguier). Nous avons ainsi sollicité une vingtaine d'ingénieurs des réseaux DEPHY EXPE et DEPHY FERME ; des gestionnaires de BDD nationales (AGROSYST, EFlpomme, EFlpêche et Epiphyt); des responsables de gestion de données de l'IFPC; des acteurs importants de la filière mangue à La Réunion via le Cirad; des fermes suivies par le GRCETA. Les partenaires impliqués dans le projet et leurs collaborateurs directs (chambre d'agriculture du Vaucluse par exemple) ont été aussi sollicités pour les données à leur disposition qu'elles soient déjà au pas encore saisies dans des BDDs existantes. En tout, nous avons ciblé la collecte de données issues de 23 projets portant sur les trois espèces. Nous avons pu récupérer des données dans des formats très différents (données brutes, documents et synthèses en pdf ou autre) avec parfois des procédures d'anonymisation. Nous avons collecté, entre autres, des données issues de la base AGROSYST, des réseaux DEPHY EXPE et DEPHY FERME essentiellement pour le pommier et le pêcher et des données manguier auprès du CIRAD et ses partenaires.

Le tri des données collectées

Vu le volume et l'hétérogénéité des données collectées, nous avons décidé de trier celles-ci pour en sélectionner celles qui peuvent nous intéresser parmi toutes. Il s'agissait de sélectionner et mettre en forme les données les *plus complètes* parmi toutes celles que nous avons pu collecter et traiter. Ce tri impose aussi de laisser de côté d'autres données difficiles à exploiter dans le temps escompté (Livrable L11). Les données sélectionnées concernent un groupe de projets en pomme, pêche, ou pomme et pêche et trois projets en mangue. Ainsi, nous avons trié des données de pommier (Ecophyto pomme) : 180 systèmes x années ; de pêcher (Ecopêche) : 232 systèmes x années ; et pommier/pêcher (Empusa/vertical) : 88 systèmes x années. Les données sélectionnées du manguier ont été acquises dans le cadre des projets Biophyto, Cosaq, et Ecoverger. Au total, 116 systèmes x années ont été collectés pour le manguier (Figure S1).

La mise en forme des données sélectionnées et l'alimentation de la base de données.

Au total, pour les trois espèces visées 616 systèmes x années ont été ainsi retenus en vue de leur intégration dans la BDD ECOFRUIT. Les données correspondantes ont été mises en forme par transformation des données brutes Excel en fichiers exploitables en utilisant des routines écrites sous Rstudio pour alimenter la BDD ECOFRUIT sous PostgreSQL. Des procédures informatiques ont été développées pour l'automatisation de l'alimentation de la BDD ECOFRUIT (Livrable L12). La BDD

ECOFRUIT est aujourd'hui opérationnelle et accessible sur demande (accès contrôlé pour le moment) via une interface web RShiny qui permet de l'interroger facilement et d'en extraire différentes informations (Figure S2).

La base de données Ecofruit est très ambitieuse mais très peu alimentée : sur les 23 projets visés, seuls 6 ont été saisis. Nous avons essuyé quelques refus ou absences de réponses de nos interlocuteurs. C'est particulièrement vrai pour le manguier où nous avons sollicité beaucoup de partenaires pour récupérer des données du réseau Dephy Mangue sans succès. Il était aussi très difficile de trouver des données associant des itinéraires techniques complets à leurs performances associées.

Les données sont parfois lacunaires pour certains couples bioagresseurs-culture, et pour certaines peu fiables. Il n'y a quasiment pas de données sur l'effet de BAS sur des services écosystémiques autres que la production, et très peu ou pas de données concernant des contextes avec des incidences modérées ou fortes, et des incidences multiples. Ce problème invite à la recherche de données et d'essais de ce type, qui dépasse le projet ODACE.

La tâche 2 : Modélisation agroécologique de vergers – coord. Françoise Lescourret (INRAE-PSH) et Isabelle Grechi (CIRAD-HortSys)

La tâche 2 avait pour objectif de modéliser l'atténuation des dégâts de BAS multiples par des leviers alternatifs aux pesticides, et leurs effets sur les performances du verger. Cette tâche a été entièrement conduite sur pommier, et en partie initiée sur les autres cultures.

Modélisation de l'atténuation des dégâts de BAS. Cette activité s'est appuyée sur la logique des modèles IPSIM (Injury Profile SIMulator) [8] utilisant la méthode de modélisation hiérarchique agrégative DEX et le logiciel DEXi [9]. L'objectif est de prédire le profil de dégât aux cultures de chaque bioagresseur considéré en fonction de facteurs relatifs aux pratiques culturales, aux conditions climatiques et à l'environnement paysager. La conception des modèles IPSIM suit plusieurs étapes (Figure S3). Pour chaque modèle IPSIM (un par bioagresseur), les attributs (facteurs précités), leur hiérarchisation et les tables d'agrégation de ces attributs ont été définis en s'appuyant sur la littérature et sur l'expertise de chercheurs et de professionnels de la filière, mobilisée lors d'ateliers et entretiens. Dès qu'une version satisfaisante l'arbre d'agrégation a été obtenue, le modèle a été construit sous DEXi avec une interface utilisateur créée sous Excel VBA (Figure 1). Des simulations ont alors été réalisées et soumises à l'avis d'experts pour tester la cohérence du modèle. La qualité prédictive d'un modèle est évaluée via une matrice de confusion entre les données simulées et observées (issues de la base Ecofruit et Epiphyt) et des indicateurs calculés sur ces matrices (Kappa de Cohen, Accuracy, F1-Score). L'arbre d'agrégation est modifié en fonction des pistes d'amélioration identifiées, jusqu'à obtenir une qualité prédictive satisfaisante ou que celle-ci stagne (plus d'amélioration) [10].

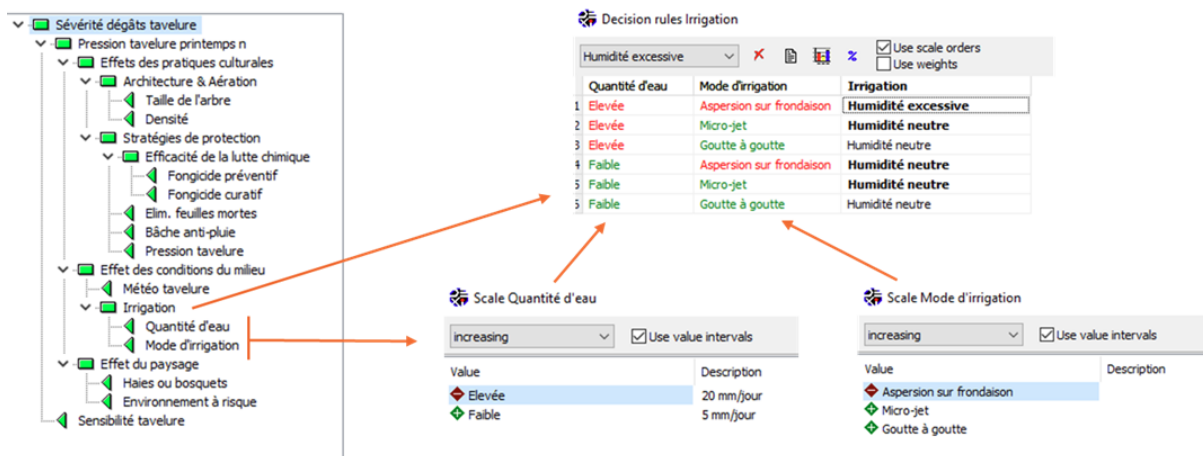


Figure 1. Illustration de la structure du modèle tavelure.

Cinq modèles IPSIM (puceron cendré, carpocapse, puceron lanigère, oïdium, tavelure) ont été ainsi développés et améliorés itérativement (Livrable L22a). Ils sont mobilisables via une interface R-Shiny ergonomique et interactive (Figure S4). Sur la base des indicateurs calculés sur les matrices de confusion, la qualité prédictive de ces modèles reste encore limitée. Selon le kappa de Cohen avec pondération quadratique, les modèles seraient de médiocre (carpocapse, puceron lanigère), léger (puceron cendré, tavelure) à quasi-passable (oïdium). Ceci peut s'expliquer par des données insuffisantes pour calibrer les modèles, ainsi que par une représentation faible des cas d'incidence moyenne ou forte et de parcelles peu ou pas traitées dans ces données. Globalement, même si l'évaluation quantitative a montré certaines limites, les niveaux de dégâts prédits par les modèles correspondent bien à ce qui est attendu par les conseillers et ceux-ci ont bien accueilli ces modèles au séminaire final du projet. Cette divergence pourrait aussi être due au manque de fiabilité de certaines données expérimentales (incohérences détectées). Ces résultats sont encourageants, et nous pouvons espérer que l'alimentation de la base de données - avec des données moins lacunaires, permettra d'améliorer itérativement la qualité prédictive des modèles. Par ailleurs, une autre perspective à considérer serait le couplage des 5 modèles pour la prise en compte des interactions écologiques possibles entre les BAs, tout en y intégrant un cortège de maladies secondaires bien citées par les conseillers.

Modélisation de l'effet des dégâts de BAs sur les performances du verger. Cette activité s'est appuyée sur le modèle de culture (arbre-sol) QualiTree [11], qui permet de simuler 9 indicateurs de services écosystémiques liés aux processus carbonés, azotés et hydriques, et relevant de la production de fruits, de la régulation du climat, de la fertilité des sols et du cycle de l'eau (Figure 2). Pour le cas d'étude pommier [12], 10 BAs (puceron cendré, puceron lanigère, carpocapse, tordeuse orientale, tordeuse de la pelure, acariens rouges, oïdium, chancre européen, feu bactérien, tavelure) ont été retenus, et classés en 7 groupes fonctionnels reflétant leur(s) mécanisme(s) de perturbation (Figure 2). Pour chaque groupe fonctionnel, nous avons défini des fonctions de couplage qui décrivent la réduction de variables de QualiTree, qui représentent les organes ou les processus physiologiques directement altérés par les BAs, en fonction de leur abondance (densité ou incidence) donnée en entrée du modèle (Livrable L23a). Ces fonctions sont formalisées sous forme d'équations définies et paramétrées sur la base de la littérature [12]. La capacité de récupération (partielle ou totale) de certaines altérations est également considérée.

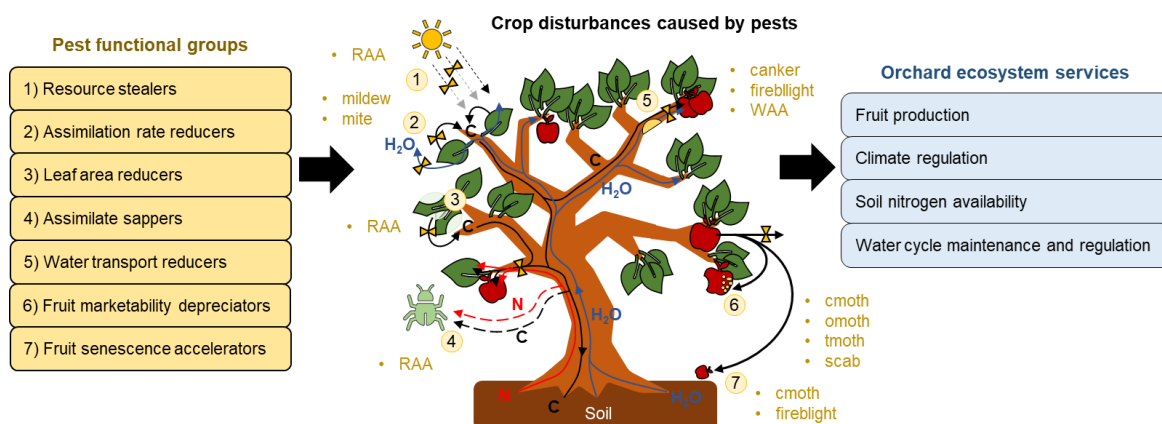


Figure 2. Représentation schématique du modèle QualiTree-Pest.

RAA: rosy apple aphid; WAA: woolly apple aphid; cmoth: codling moth; omoth: oriental fruit moth; tmoth: tortrix moth

Le modèle ainsi développé a ensuite été utilisé pour tester et hiérarchiser l'effet des 10 BAs sur la variation des 9 indicateurs de services écosystémiques prédits [14]. Un total de 3^{10} (59049) scénarios ont été simulés, correspondant à trois niveaux d'abondance (absent, moyen, fort) pour chacun des 10 BAs, dans conditions de culture standard. Les organes infestés/infectés par un BA ont été sélectionnés au hasard parmi l'ensemble des organes de l'arbre. Les simulations ont ensuite fait l'objet d'une analyse de sensibilité bayésienne de Monte-Carlo (Livrable L24a). Cette analyse montre que dans des conditions de culture standard, seuls 4 indicateurs sont affectés par les BAs : le rendement commercialisable, la qualité des fruits (degré Brix), la séquestration du carbone, et le drainage (Figure 3). Les BAs impactent très peu les autres services qui concernent le sol, malgré les interactions fonctionnelles entre la plante et le sol qui sont représentées dans QualiTree. Parmi les BAs considérés, ceux qui contribuent le plus aux variations observées sont le carpocapse et le feu bactérien pour le rendement commercialisable et la séquestration du carbone, le feu bactérien pour la qualité des fruits, et l'oïdium (suivi du chancre, du feu bactérien, du puceron lanigère et des acariens) pour le drainage.

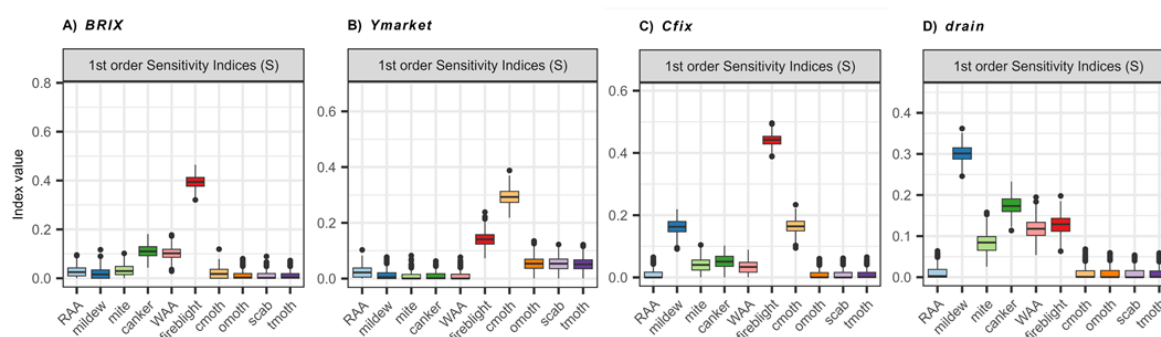


Figure 3. Indices de sensibilité de premier ordre traduisant l'effet principal des 10 BAs sur le degré Brix (A), le rendement commercialisable (B), la séquestration du carbone (C) et le drainage (D).

Une des limites de cette étude est que nous n'avons pas été en mesure d'évaluer formellement notre modèle, faute de données appropriées pour comparer les simulations avec des observations. Les gammes de valeurs des indicateurs simulés

sont toutefois cohérentes avec celles trouvées dans la littérature, au moins dans les rares travaux où elles étaient disponibles ou comparables.

Notre approche fournit un outil opérationnel qui ouvre plusieurs perspectives d'application. Il pourrait par exemple servir à cartographier et quantifier les voies de perturbation des BAs, tester l'impact de différents schémas d'infestation / infection spatiale et temporelle, ou évaluer l'impact des BAs dans des conditions de culture non optimales induisant des stress abiotiques. Par ailleurs, cette approche est générique et transposable à d'autres espèces, dans le cas où un modèle de culture existe et que les processus impactés par les BAs y soient représentés. Le modèle QualiTree pour le pêcher et V-Mango [15, 16] pour le manguier sont disponibles. Les mêmes groupes fonctionnels permettraient de représenter les mécanismes de perturbation des principaux BAs du pêcher (bactériose, chancre, cicadelle, cloque, forficules, moniliose, oïdium, puceron cigarier, puceron farineux, puceron noir, puceron vert, thrips californien, tordeuse orientale et Xanthomonas) [12] et du manguier (anthracnose, bactériose, cécidomyie des feuilles, cécidomyie des fleurs, charançon du noyau, cochenilles, mouches des fruits, oïdium, punaise, tétranyque et thrips) [12, 17]. Un nouveau groupe - réduction du nombre d'inflorescences et de fruits, serait toutefois nécessaire pour trois BAs du manguier (oïdium, cécidomyie des fleurs et punaise) qui affectent la viabilité des inflorescences. Toutefois, les connaissances et les données quantitatives sur les mécanismes de perturbation des BAs du manguier sont limitées [17], ce qui va rendre le paramétrage des fonctions de couplage difficile. Par ailleurs, le transfert de la démarche sur manguier va nécessiter des évolutions de V-Mango [18]. Certaines, concernant la photosynthèse et l'allocation du carbone, ont été engagées en 2024 pour que le modèle soit en mesure de rendre compte de l'effet indirect de BAs affectant les processus liés au carbone sur la production [17, 19].

La tâche 3 : Co-conception des itinéraires techniques – coord. Natacha Sautereau (ITAB), Baptiste Labeyrie (CTIFL) et Julie Borg (INRAE-PSH)

Cette tâche a défini des typologies de stratégies de production pour le pommier puis à les simuler par modélisation, en interactions avec les tâches 2 et 4.

Les trois partenaires de la tâche (INRAE-PSH, CTIFL, ITAB), avec l'appui d'AGIR et Purpan, ont élaboré une grille d'entretien permettant d'enquêter des professionnels de la filière pour **définir des stratégies de production de pomme existantes**, dans les trois principaux bassins de productions de Pomme (Sud-Est, Sud-Ouest et le Val-de-Loire). Les entretiens ont permis de collecter des informations sur le contexte de production (climat, type de sol, pression de BAs, date de floraison), les pratiques agricoles (dates d'éclaircissage et de récolte, leviers de protection, pratiques de fertilisation et d'irrigation) et les critères de production (rendement, calibre, dégâts, sucres/amidon et valeurs seuils) (Livrable L31). Les enquêtes ont aussi permis de repréciser les catégories de leviers de protection (génétique, barrière physique, produits de biocontrôle...) pour faciliter la définition des stratégies de protection (combinaison de différentes catégories de leviers de protection).

Les animateurs de la tâche 3, en collaboration avec les autres partenaires techniques du projet (CETA Vidourle et Sud Expé), ont validé les différentes stratégies de production de pomme résultant de ces enquêtes (Figure S5).

Les enquêtes ont permis de définir trois profils différents de producteurs de pomme (verger éco-responsable, Agriculture Biologique (AB) traditionnelle et AB de rupture) qui ont été décrits dans 3 bassins de production. Le profil AB de rupture n'a été recensé que dans les bassins du Sud-Est et du Sud-Ouest, et le bassin du Val-de-Loire comptait deux déclinaisons des profils 'éco-responsable' et 'AB traditionnelle' [20].

Ces profils traduisent des contraintes et des objectifs contrastés, avec différents **critères d'évaluation** (Livrable L32). Les discussions avec les experts ont permis aussi de relever deux profils prospectifs : AB « industrielle » et AB « agro-écologique ». Le profil AB « industrielle » représente des producteurs s'orientant vers de la production biologique intensive, avec de forte densité de plantation et une grande place de la mécanisation. La protection des cultures passe essentiellement par la pose de filet-mono-parcelle qui laisse peu de place pour le contrôle biologique. Les critères de production sont proches des vergers écoresponsables, avec un fort tonnage à l'hectare et des fruits sans défauts. Les qualités gustatives ne sont pas considérées. Le profil AB « agro-écologique » représente des producteurs s'orientant vers de la production biologique en circuits courts et en rupture. Ils mettent en œuvre des leviers innovants (introduction d'animaux, plantes de service attractives, bandes fleuries, nichoirs...) pour favoriser les services écosystémiques de régulation (Livrable L33a).

Les enquêtes ont également permis de faire remonter à la tâche 2 les **critères d'évaluation** importants pour les professionnels mais non pris en compte par l'outil (critères de coloration et de fermeté des fruits). Elles ont aussi mis en évidence que des critères de l'outil n'étaient pas pris en compte par les professionnels (critères en lien avec la qualité des sols, sauf pour certains producteurs en AB). Ces critères sont peu pris en compte du fait du manque de connaissance sur la gestion de l'azote organique et des processus associés (maîtrise de la disponibilité de l'azote), mais surtout du fait qu'il n'y a pas de valorisation économique de ces critères "sol".

Enfin, la dernière étape consistait à **traduire les stratégies de production** pour les modèles de la tâche 2, afin de **simuler ces stratégies** et vérifier que les sorties du modèle (en particulier les indicateurs de production) étaient en accord avec l'existant. Ainsi les éléments relatifs au contexte de production (climat, type de sol, pression de BAs, date de floraison), aux pratiques agricoles (dates d'éclaircissage et de récolte, pratiques de fertilisation et d'irrigation) et aux critères de production (rendement, calibre, qualité des fruits) ont été traduits pour le modèle Qualitree, pour toutes les stratégies de protection. De même, les éléments relatifs aux leviers de protection ont été traduits pour les arbres IPSIM (Figures S6 et S7). Puis, nous avons simulé les stratégies de production existantes, qui constituaient les scénarios de référence. Des valeurs seuils ont été définies pour que le modèle utilise des gammes de valeurs réalistes, et qu'il simule des valeurs proches de celles mentionnées lors des enquêtes en particulier pour les indicateurs de performance. Par la suite, nous avons exploré le modèle dans une plus large diversité de contextes de production. Nous avons ainsi généré un grand nombre (5832) de scénarios (3 niveaux de dégâts pour les 5 BAs les plus dommageables au pommier, 3 niveaux de densités de plantation, 2 niveaux de charge en fruits, 2 niveaux d'irrigation et 2 niveaux de fertilisation) et les comparer aux stratégies de référence.

Des allers-retours entre les tâches 2, 3 et 4 ont permis de revoir certains paramètres du modèle et de valider les sorties de simulations, de sorte à pouvoir représenter correctement les stratégies de production dans Qualitree [21].

Tâche 4 : Développement de l'outil de co-conception – coord. Mohamed-Mahmoud Memah (INRAE-PSH) et Antoine Rolland (Univ. Lyon-ERIC)

La tâche était dédiée au développement de l'outil proprement dit de co-conception. Pour cela, elle devait mobiliser la BDD de la tâche 1, les modèles de la tâche 2, et les profils d'acteurs définis dans la tâche 3. D'un point de vue méthodologique, cette tâche comptait initialement 3 sous-tâches :

Elicitation des préférences des décideurs

Il était prévu de faire appel à des méthodes d'aide à la décision multicritère et d'agrégation des préférences (UTA, ELECTRE TRI, PROMETHEE et DRSA) et de machine learning pour apprendre le raisonnement des acteurs sur la base d'un classement d'un ensemble de scénarios par les acteurs et de valider ce classement sur un autre ensemble. Pour explorer cette piste, un premier travail a été réalisé dans le cadre du stage de Césure de Mr Yvan Thorel [22]. Ce travail nous a permis de voir les limites de ces méthodes pour produire des scénarios-types dans notre cas d'étude. Ceci est dû au nombre très important d'alternatives (scénarios) à comparer et le temps nécessaire pour des acteurs/experts à faire cette double tâche très chronophage d'annotation, mais aussi à la difficulté de paramétrage de certaines méthodes. Nous avons donc opté pour développer une méthode d'aide à la décision innovante utilisant un clustering ad-hoc pour sélectionner les meilleurs scénarios à présenter à chaque acteur (Cf. rapport d'Yvan Thorel pour plus d'information).

Exploration par simulation et optimisation des modèles de ravageurs-culture

Cette sous-tâche constitue la base de l'outil à développer. Son objectif est d'explorer les modèles ravageurs-culture afin d'identifier des scénarios permettant d'aboutir aux meilleurs compromis entre les performances visées qui sont potentiellement antagonistes.

Le travail d'exploration de modèle réalisé par la tâche 3 portait sur un nombre relativement grand de simulations et nous a permis d'évaluer les temps de calcul nécessaires. Ainsi, l'exploration d'un seul bassin de production 'sud-est' pour un seul profil d'arboriculteur (verger éco-responsable) a montré que le temps de calcul associé est assez conséquent et ce malgré la parallélisation sur 32 cœurs d'un serveur. Ce constat nous a convaincu de ne pas avoir recours à l'optimisation **faisant appel au modèle** ravageurs-culture vu qu'elle demanderait beaucoup plus de temps, et de nous limiter à un nombre de simulations assez élevé avec un plan d'expérience bien réfléchi.

Nous étions confrontés à une problématique d'explosion combinatoire : le nombre de combinaisons possibles entre leviers (IPSIM et Qualitree) amène un nombre gigantesque de scénarios (Figure 4). La création de l'ensemble des scénarios possibles par la fusion des bases de simulations à disposition n'était pas envisageable en raison d'un problème computationnel évident. Nous avons décidé de ne faire varier, dans les bases IPSIM, que les leviers les plus importants en termes de prédiction d'incidence des bio-agresseurs. Ces derniers leviers ont été déterminés par des méthodes de classification supervisée de forêts aléatoires. Pour fixer les modalités des autres leviers, nous avons utilisé les travaux effectués lors de la tâche 3,

notamment les profils d'arboriculteurs. Nous avons donc utilisé ces profils comme le moyen de définir des modalités par défaut des leviers moins influents [23, 24]. En procédant ainsi, nous réduisons la combinatoire en filtrant certaines modalités d'un levier non compatibles avec le profil de l'utilisateur/acteur (traitement phytosanitaire pour profil AB rupture par exemple). Le même mécanisme de filtrage est utilisé avec des objectifs et contraintes sur les critères d'évaluations (rendement minimal acceptable par exemple).

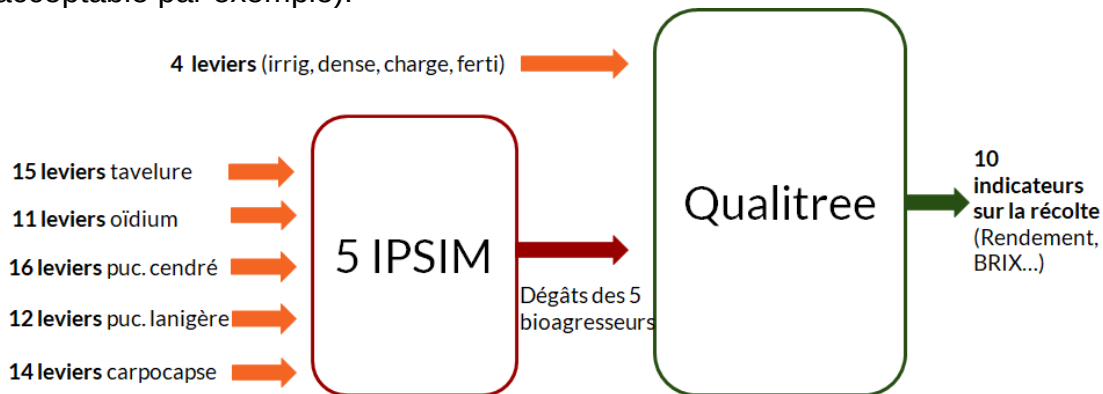


Figure 4. Couplage IPSIM-Qualitree et explosion de nombre de scénarios possibles

Mise en place du cœur de l'outil

Il s'agit d'un système de recommandation et d'inférence de décisions qui est le cœur de l'outil. Ainsi, un mécanisme d'inférence sélectionne un ensemble de scénarios adaptés au contexte et préférences de l'utilisateur, saisis dans un questionnaire simple.

Deux méthodes d'exploration de scénarios ont été proposées [23, 25].

- La première méthode dite de classification opère les étapes suivantes : (i) elle filtre toutes les configurations possibles selon le profil d'acteur (rendement min par exemple, leviers les moins importants fixés,), (ii) elle extrait le Front de Pareto correspondant, (iii) elle effectue une classification en utilisant la méthode *k*-means sur quatre indicateurs les plus importants selon le modèle : le rendement, le Brix, le carbone séquestré à l'intérieur et le drainage. Par la suite, dans chaque classe, trois scénarios sont sélectionnés selon différents critères : le rendement maximal (productivité), la présence des leviers environnementaux (biodiversité), l'absence des leviers contraignants (peu d'investissement). Ces propositions de scénarios sont choisies pour être les plus proches des pratiques actuelles de l'agriculteur. Ces trois propositions ont donc des indicateurs de production très proches et diffèrent essentiellement sur les leviers.
- Une autre méthode de recherche proposée est l'exploration par optimisation ***mais sans un appel au modèle*** : elle parcourt, par un algorithme de recherche locale, les combinaisons possibles des leviers en suivant la direction qui maximise un indicateur (le rendement par exemple) et qui minimise la quantité de leviers mobilisés pour rester dans le voisinage des pratiques actuelles de l'agriculteur. Le programme se base sur une liste ou pile de configurations, classées selon leur valeur. A chaque itération, il extrait celle dont la valeur est la plus élevée, fait varier chacun de ses leviers dans les deux directions si possible, et ajoute toutes ces nouvelles configurations à la pile. Comme cette recherche n'est pas exhaustive, on aboutit toujours à des configurations différentes, ce qui permet de faire des propositions bien distinctes/contrastées.

Le paramétrage de la méthode permet de modifier certains paramètres de recherche. La distance entre les propositions est mesurée comme la somme des différences de niveaux des leviers. Si on diminue la période de recherche avancée, le temps de recherche sera plus long mais les propositions seront probablement plus intéressantes. Enfin, le poids des contraintes indique l'équilibre à mettre entre la maximisation de l'indicateur cible (à 0) et la minimisation des leviers (à 1).

Ces deux méthodes sont proposées dans l'outil final pour laisser le choix à l'utilisateur de comparer leurs sorties. Elles sont illustrées en annexe de ce rapport (Figures S8 et S9).

Il est important de noter que des décisions de simplification assez fortes ont été prises pour aboutir à un outil opérationnel. Ces décisions ont permis de contourner certaines difficultés liées aux limites des outils informatiques (capacité de stockage pour de très grosses tables). Ces décisions limitent certainement le champ du possible exploré par l'outil proposé pour identifier des scénarios adaptés à chaque profil d'utilisateur. En outre, peu de tests en ateliers de l'outil développé ont été conduits. Il est primordial de faire des tests à une échelle beaucoup plus large pour améliorer l'outil et y intégrer les retours d'expérience des utilisateurs.

3. Réalisations de transfert et de valorisation

Un recueil synthétique des **réalisations et valorisations produites au cours du projet est donné ci-après :**

- (1) La **base de données Ecofruit** est opérationnelle.
- (2) Un **modèle de culture QualiTree-Pest** prenant en compte un cortège de BAs et simulant un ensemble de services écosystémiques pour le pommier. Ce modèle est disponible sur le site SK8 dédié aux applications Shiny développées à INRAE <https://qualitree.sk8.inrae.fr/>.
- (3) Des **modèles IPSIM** développés pour 5 BAs majeurs du pommier sont mobilisables via une interface conviviale R-Shiny.
- (4) Un **outil de co-conception** développé pour le pommier, preuve de concept de la démarche qui pourrait être transposée à d'autres espèces.
- (5) Des **publications scientifiques** (2 parues, 2 acceptées, et 2 prévues) pour valoriser les travaux réalisés.
- (6) Des **communications** dans des conférences internationales (4), des congrès nationaux (2), et des réseaux locaux (3) pour présenter le projet.
- (7) La **formation d'étudiants** : 9 étudiants, en écoles d'ingénieurs ou universités ou lycée agricole, encadrés lors de stages de césure ou de fin d'études.
- (8) Des **ateliers** de conception des modèles IPSIM et entretiens avec les conseillers pour les valider.
- (9) Des **enquêtes** réalisées pour définir les profils d'acteurs (avec le concours d'un projet tutoré pour étudiants ingénieurs Purpan)

4. Actions d'animation et de coordination du projet

De nombreuses réunions entre porteurs de tâches ont été organisées pour suivre l'avancement du projet et trouver des solutions aux difficultés rencontrées. Nous

avons aussi organisé quatre réunions annuelles au cours du projet qui ont rassemblé 15 à 22 personnes impliquées dans le projet ou invitées (Livrables L01 à L04).

Réunion de lancement (27 janvier 2021)

L'objectif de cette réunion, tenue en distanciel vu le contexte Covid, était d'abord de permettre à tous les partenaires du projet de faire connaissance, de rappeler les objectifs et l'organisation du projet en tâches, et discuter des modalités de mise en œuvre des activités prévues par tâche et des interactions entre tâches. Il a notamment été décidé que toutes les tâches initient leurs activités sur le pommier pour favoriser les interactions.

Réunion annuelle de deuxième année (30 mars 2022)

Cette réunion avait pour objectif de faire le bilan de l'avancement des activités par tâche, de faire remonter les difficultés rencontrées et les questions émergentes pour essayer d'y répondre collectivement. Ainsi, une grande partie de cette réunion était dédiée à quatre ateliers de travail en sous-groupes.

L'**atelier 1** s'est proposé de répondre à des questions liées à la prise en compte dans la démarche/l'outil de leviers mobilisant la biodiversité planifiée (plantes de service, IAE dans le verger et le paysage), en particulier : quelle biodiversité planifiée mobiliser pour Odace ? Peut-on quantifier et modéliser son efficacité ? L'**atelier 2** visait à consolider la **construction du modèle IPSIM pommier-puceron cendré**. Les experts présents ont ainsi fait un retour critique sur le modèle développé, en donnant leurs avis sur le choix des facteurs favorisant le BA et sur les échelles choisies, ce qui a permis de l'améliorer.

L'**atelier 3** s'est penché sur les liens entre les tâches 1 et 2 : il visait à identifier les apports potentiels de la BDD pour la conception et la validation des modèles IPSIM et QualiTree-Pest selon leurs besoins en termes de données quantitatives.

L'**atelier 4** s'est penché sur les liens entre les tâches 3 et 4 : il visait en particulier à identifier clairement les critères de performance disponibles à partir des sorties du modèle QualiTree-Pest, définir leur sens d'optimisation souhaitée (minimisation/maximisation), et discuter de la faisabilité d'incorporer d'autres critères comme les résidus et IFTs dans l'outil final. Cet atelier a aussi permis de préparer les ateliers d'élicitation de préférences qui seront réalisés auprès des acteurs/experts des filières pour définir les profils d'acteurs et typologies de stratégie. Face à la difficulté de la tâche d'élicitation dans notre cas d'étude et à sa nature chronophage, il a été décidé de s'orienter vers des méthodes d'aide à la décision moins contraignantes, telles que le clustering, et avons discuté des simulations à faire avec les profils d'acteurs identifiés et leur utilisation pour la conception de l'outil.

Lors de cette réunion, étant donné les retards et difficultés constatés, nous avons décidé de demander une prolongation d'un an pour la réalisation du projet.

Réunion annuelle de troisième année (11 octobre 2023)

Cette réunion avait pour objectif de présenter le premier prototype de l'outil de conception et de discuter de ses évolutions (intégration des modèles IPSIMs pour le puceron lanigère et l'oïdium) et de ses améliorations potentielles. Nous avons aussi présenté la version courante de la base de données (données pommier et pêcher), et discuté de sa mise à jour avec les données manguier, d'une part, et de sa mobilisation possible pour valider les modèles IPSIMs et QualiTree-Pest sur pommier.

Réunion finale (11 décembre 2024)

Cette réunion de clôture du projet était consacrée principalement aux démonstrations des différents livrables opérationnels. La BDD ECOFRUIT mise à jour a été présentée et son devenir après le projet a été discuté (Livrable L13). Les modèles IPSIMs pour 5 BAs du pommier ont été présentés et des démonstrations ont été faites (Livrable L22a). Ceci nous a permis d'avoir des retours très positifs des experts présents, ainsi que quelques recommandations, en particulier pour améliorer celui sur le puceron lanigère qui était très pessimiste dans sa prédiction. L'outil de conception a également été présenté et ses sorties commentées et discutées (Livrable L36). Des retours critiques ont été faits qui nous ont permis d'améliorer la version (Livrables L34a et L45). La dernière partie de la réunion était consacrée aux suites à donner au projet et les liens avec d'autres projets (CACOLAC, CapZéroPhyto, thèse de Corisande Douay à l'IRHS d'Angers, co-encadrée par Marie-Hélène Robin).

Références citées

- [1] Feschet Pauline, Bockstaller Christian. 2014. Méthodes d'évaluation multicritère des systèmes agricoles et ACV sociale, quelle complémentarité ? In: Social LCA in progress. Macombre Catherine (ed.), Loeillet Denis (ed.). Montpellier: CIRAD, 18-25. (Fruitrop thema / CIRAD) International Seminar in Social Life Cycle Assessment. 4, Montpellier, France, 19 Novembre 2014/21 Novembre 2014.
- [2] Christian Bockstaller, M. Cariolle, M-B. Galan, L. Guichard, C. Leclercq, et al. Evaluation agrienvironnementale et choix des indicateurs : acquis, enjeux et pistes. Innovations Agronomiques, INRA, 2013, 31, pp.1-14.
- [3] Sadok W., Angevin F., Bergez J.E., Bockstaller C., Colomb B., Guichard L., Reau R., Messean A., Dore T. (2009) MASC, a qualitative multi-attribute decision model for ex ante assessment of the sustainability of cropping systems, *Agronomy for Sustainable Development* 29, 447-461.
- [4] Damien Craheix, Frederique Angevin, Jacques - Eric Bergez, Christian Bockstaller, Bruno Colomb, et al. MASC 2.0, un outil d'évaluation multicritère pour estimer la contribution des systèmes de culture au développement durable. *Innovations Agronomiques*, INRA, 2012, 20, pp.35 - 48.
- [5] Elise Pelzer, Gabriele Fortino, Christian Bockstaller, Frédérique Angevin, Claire Lamine, Camilla Moonen, Vasileios Vasileiadis, Daniel Guérin, Laurence Guichard, Raymond Reau, Antoine Messéan, Assessing innovative cropping systems with DEXiPM, a qualitative multi-criteria assessment tool derived from DEXi, *Ecological Indicators*, Volume 18, 2012, Pages 171-182,
- [6] Antoine Messean, Elise Pelzer, Christian Bockstaller, Claire Lamine, Frédérique Angevin. Outils d'évaluation et d'aide à la conception de stratégies innovantes de protection des grandes cultures. *Innovations Agronomiques*, INRA, 2010, 8, pp.69-81.
- [7] Clémence Monot & Pierre Valsesia (2022). Base de données du projet ODACE. Conception du diagramme entité-relation. Document de 70p. joint à ce rapport.

- [8] Aubertot, JN., Robin, MH. (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).
- [9] Bohanec M, Messéan A, Scatasta S, Angevin F, Griffiths B, Krogh PH, et al. 2008. A qualitative multi-attribute model for economic and ecological assessment of genetically modified crops. Ecol Modeling 215: 247–261.
- [10] Lescourret, F., Moitrier, N., Valsesia, P., Génard, M. (2011). QualiTree, a virtual fruit tree to study the management of fruit quality. I. Model development. Trees-Structure and Function 25, 519-530.
- [11] Valentine Mouche (2022). Conception d'un outil d'aide à la décision pour la gestion des dégâts des bio-agresseurs du pommier. Mémoire de fin d'étude ISARA, Lyon, 52p. Livrable 22a.
- [12] Octave Lacroix, Isabelle Grechi, Michel Génard, Alain Ratnadass et Françoise Lescourret (2021). Revue bibliographique des dégâts des bioagresseurs du pommier <hal-04321830>
- [13] Dietze M-C., Matthes J-H., 2014. A general ecophysiological framework for modelling the impact of pests and pathogens on forest ecosystems. Ecology Letters, 17, 1418-1426.
- [14] 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, <https://doi.org/10.1016/j.agsy.2023.103808>. (Livrable L25).
- [15] Boudon F., Persello S., Jestin A., Briand A-S., Grechi I., Fernique P., Guédon Y., Léchaudel M., Lauri P-E., Normand F (2020). V-Mango: A functional-structural model of mango tree growth, development and fruit production. Annals of Botany. DOI 10.1093/aob/mcaa089
- [16] Vaillant, J., Grechi, I., Normand, F., Boudon, F. (2022). Towards virtual modeling environments for functional structural plant models based on Jupyter notebooks: Application to the modeling of mango tree growth and development. in silico Plants, 4(1), 2022, diab040
- [17] Chemier Apolline (2024). Contribution à la modélisation de la photosynthèse du manguier et de l'effet de bioagresseurs sur le fonctionnement de l'arbre et de sa production. Rapport de stage de césure. Institut Agro Montpellier. 25p. Contribution au Livrable L23c.
- [18] Grechi, I., Normand, F., Vaillant, J., Carrié, E., Léchaudel, M. and Boudon, F. (2025). V-Mango, a functional-structural plant model of mango tree growth, development and fruit production: from model design to applications. Acta Hort. 1415, 87-94. <https://doi.org/10.17660/ActaHortic.2025.1415.10>
- [19] Bolot Maëlle (2024). Analyse de structures fructifères chez le manguier. Rapport de stage de césure. AgroParisTech. 40p. Contribution au Livrable L23c.

[20] Julie Borg, Baptiste Labeyrie, Natacha Sautereau (2024). Odace, action 3. Présentation des profils d'acteurs. Document joint à ce rapport.

[21] Etienne Barthélémy (2022). Simulation et analyse de profils d'acteurs et de stratégies de protection de pommier à l'aide d'un modèle agronomique couplé à un modèle de dégâts de bioagresseurs. Rapport de stage AI ISARA Lyon, 21p. Livrable 33a.

[22] Yvan Thorel (2022). Développement d'une démarche d'éllicitation de préférences des acteurs pour accompagner la conception de solutions innovantes de protection des plantes dans le contexte arboricole. Rapport de stage de Césure, CentraleSupélec, 24p. Livrable L41.

[23] Sacha Lavaud (2023). Projet ODACE, Fiche technique de la tâche 4. Mémoire de M2, Université Claude Bernard de Lyon, 28p. Livrable L42.

[24] Félix Ourgaud (2024). Modélisation des stress biotiques du pommier. Mémoire de M2, Université Claude Bernard de Lyon, 43p. Livrable L43.

[25] Memah, M-M., Aubertot, J-N., Borg, J., Génard, M., Grechi, I., Lavaud, S., Lescourret, F., Ndalla-Landou, D., Robin, M-H., Valsesia, P., Vercambre, G., Rolland, A. (2024). Towards a tool to support the design of plant protection solutions in the context of fruit growing: ODACE project. 27th International Conference on Multiple Criteria Decision Making (MCDM2024), 2 to 7 June 2024, Hammamet, Tunisia. Livrable L35.

Annexes

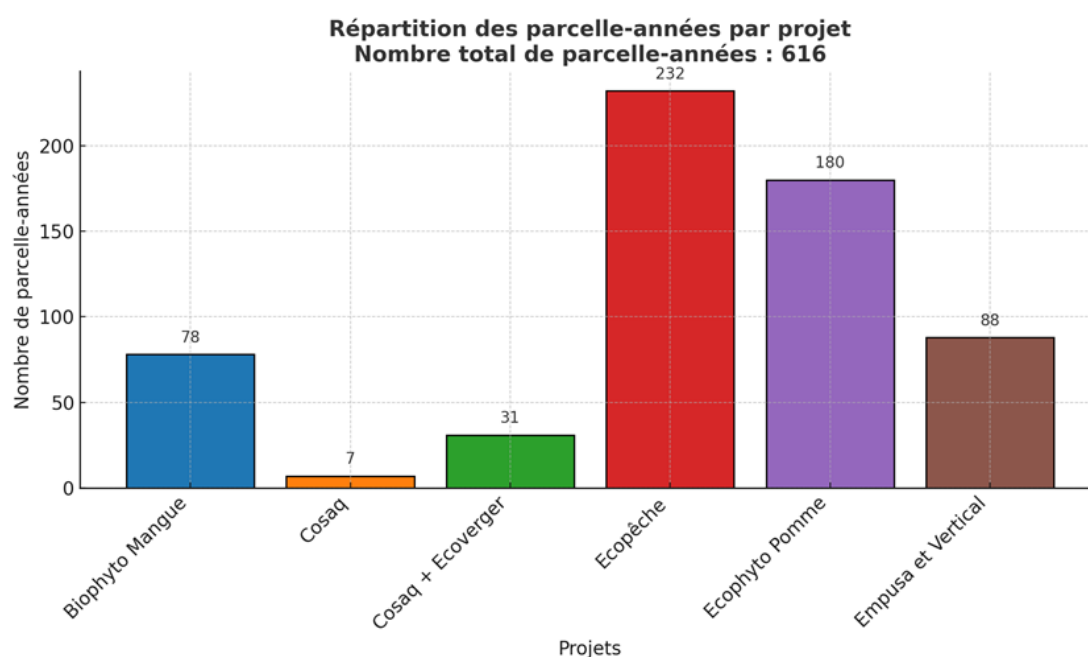


Figure S1. Illustration du contenu de la BDD ECOFRUIT.

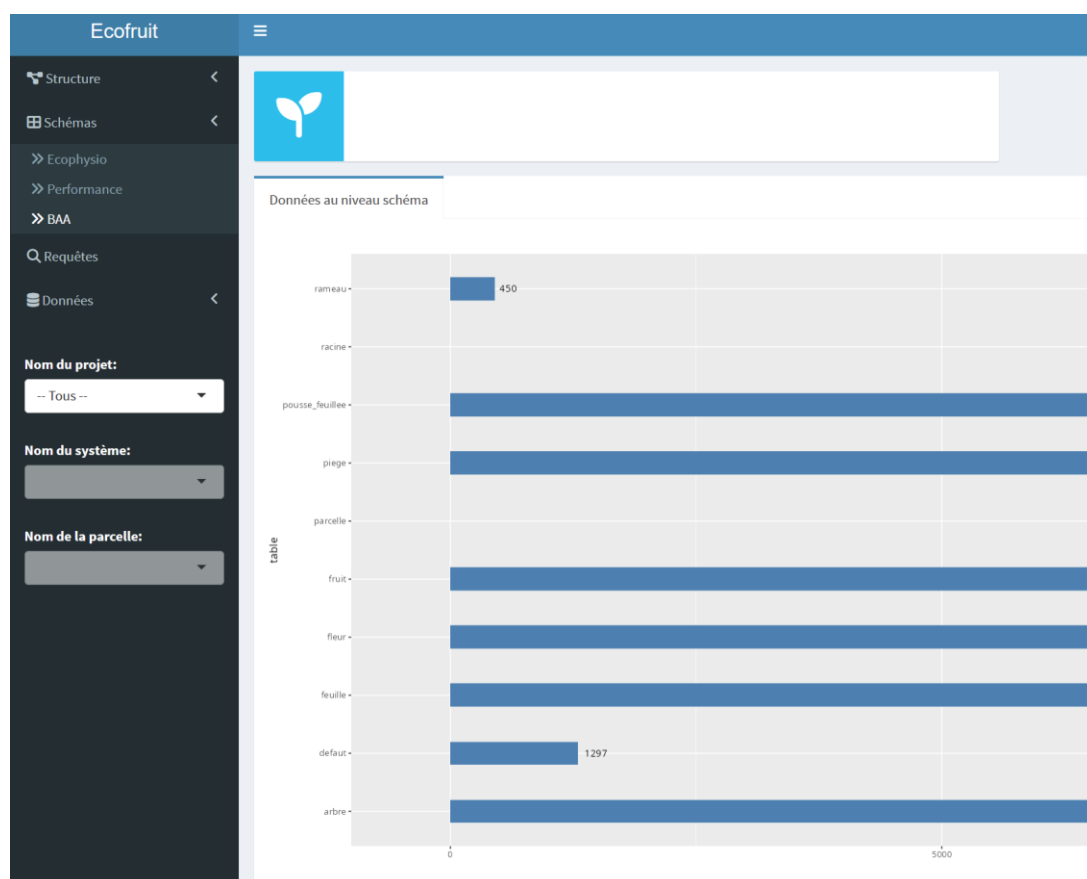


Figure S2. Interface graphique et contenus du schéma BAA (bioagresseurs et auxiliaires) de la base de données ECOFRUIT.

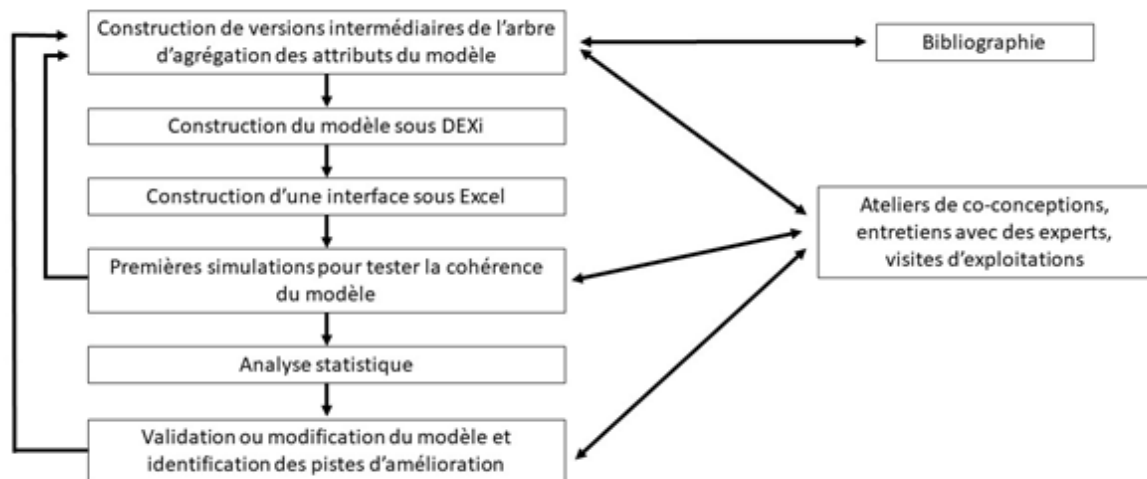


Figure S3. Schéma des différentes étapes suivies lors de la construction des modèles IPSIM pommier.

The screenshot displays the IPSIM R-shiny web application interface. The top navigation bar includes links for 'Accueil', 'Caractéristiques', 'Outils', 'Paramètres', 'Simulations', and 'Gérer les modèles'. The main content area is titled 'Simulations par lot' and includes a 'Sélectionner votre fichier CSV' field, a 'Nom de la colonne des résultats observés (optionnel)' field, and a 'Séparateur CSV' dropdown menu. Below this, the 'Simulation détaillée' section is visible, showing various parameters for simulation configuration. These parameters are organized into two columns and include options for 'Précision cartographique', 'Lutte G3 cartographique', 'Lutte G3 cartographique', 'Surface vergers', 'Elim. zones refuges', 'Eclaircissage', 'Hâles ou bosquets', 'Régulation automatique', 'Lutte G3 cartographique', 'Flots B01 vergers', 'Confusion sexuelle', 'Nichoirs', 'Environnement à risque', and 'Méthode cartographique'. Each parameter has a set of radio buttons or checkboxes for selection.

Figure S4. Interface R-shiny des IPSIMs développés.

Figure S5. Profils identifiés dans les 3 principaux bassins de production de pommier.

Figure S6. Exemple de traduction des profils pour un IPSIM (puceron cendré).

Géographie et profils

Vos pratiques culturales

Lutte chimique

Scénarios par exploration

Scénarios par classes

À propos

Sélectionnez votre région

Régions

Bassin Ouest

Bassin Sud-Est

Bassin Sud-Ouest

Décrivez vos pommiers

Variété cultivée

☐ Chantecler
☐ Gala
☒ Golden
☐ Granny Smith
☐ Pink Lady

Porte-greffe

☐ M7
☒ M9
☐ NAKS

Décrivez votre verger

Surface du verger

☐ Petite (<2 ha)
☒ Moyenne (2-10 ha)
☐ Grande (> 10 ha)

Densité de plantation (arb/ha)

☐ 1500
☒ 2000
☐ 2250
☐ 2500

Type de culture

☒ Bio-responsable
☐ AB traditionnelle
☐ AB rupture

Vergers voisins non protégés

☐ Oui
☒ Non

Décrivez l'année précédente

Pression tavelure

☒ Forte - Moyenne régionale
☐ Moyenne
☐ Faible

Pression oïdium

☒ Forte
☐ Moyenne - Moyenne régionale
☐ Moyenne
☐ Faible

Septembre

☒ Chaud et sec
☐ Pluvieux

Pression carpocapse

☐ Forte
☐ Moyenne
☒ Faible - Moyenne régionale

Pression puc. cendré

☒ Forte - Moyenne régionale
☐ Moyenne
☐ Nulle ou faible

Pression puc. lanigère

☒ Moyenne à forte - Moyenne régionale
☐ Nulle ou faible

Figure S7. Description des contextes de production sur l'interface de l'outil Odace.

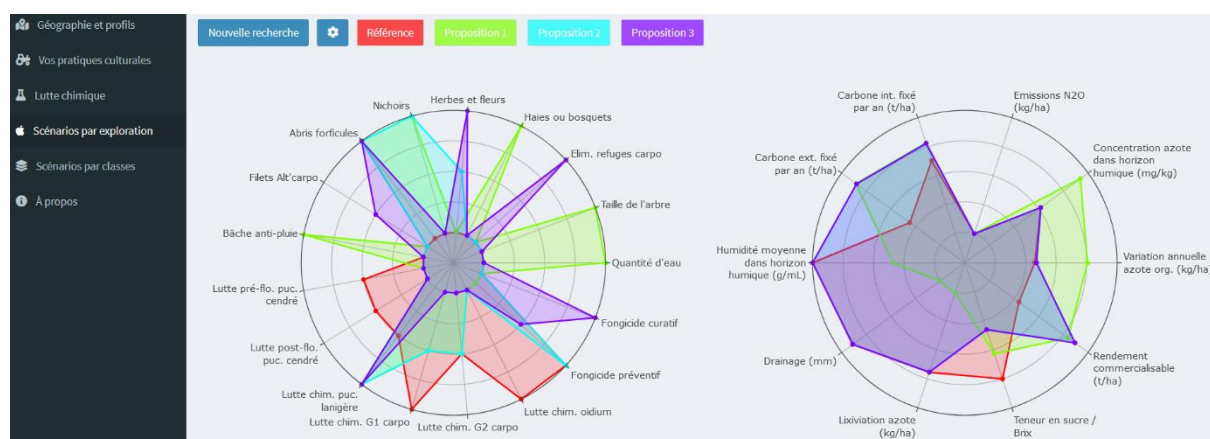


Figure S8. Illustration de la méthode d'exploration de l'outil Odace.

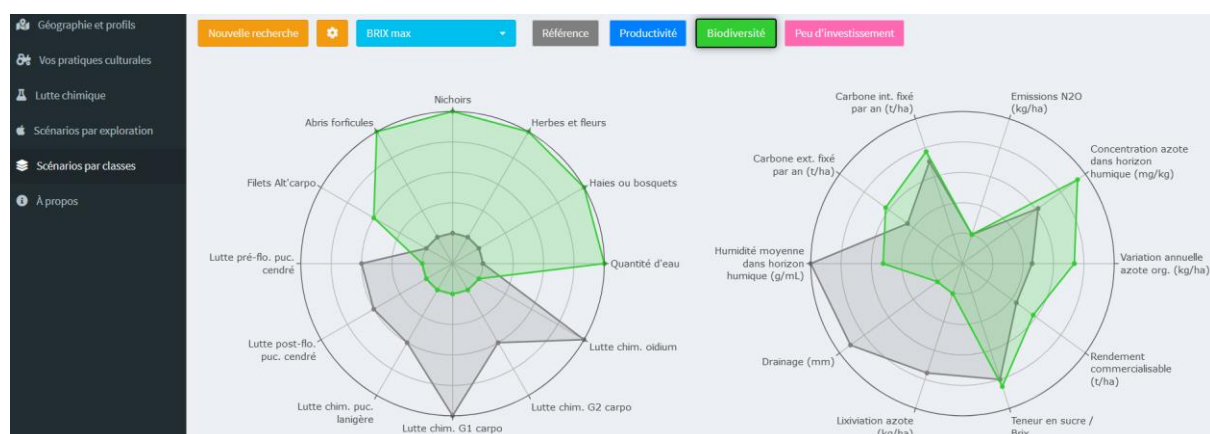


Figure S9. Illustration de la méthode de classification de l'outil Odace.

Liste des livrables par tâche	Date de remise
T0 - Coordination	
L01 Réunion annuelle 1 : lancement du projet	1
L02 Réunion annuelle 2 : évaluation critique des résultats acquis et réajustement des activités si besoin	15
L03 Rapport intermédiaire sur l'avancement du projet	24
L04 Réunion annuelle 3 : évaluation critique des résultats acquis et réajustement des activités si besoin	28
L05 Rapport final sur le déroulement et les résultats du projet	48
T1 – Collecte, tri, et mise en forme des données et connaissances expertes	
L11 Fichiers Access exploitables	7
L12 Base de données Access contenant toutes données au sens large	17
L13 MAJ annuelle de la base de données	24
T2 – Modélisation agroécologique de vergers	
L21 Revue bibliographique sur la modélisation multiagresseurs, choix méthodologiques	12
L22a Modèle de dégâts de bioagresseurs IPSIM pommier	21
L22b Modèle de dégâts de bioagresseurs IPSIM pêcher	33
L22c Modèle de dégâts de bioagresseurs IPSIM manguier	45
L23a Modèles de culture intégrant les effets de groupes fonctionnels de bioagresseurs du pommier	24
L23b Modèles de culture intégrant les effets de groupes fonctionnels de bioagresseurs du pêcher (préliminaire)	36
L23c Modèles de culture intégrant les effets de groupes fonctionnels de bioagresseurs du manguier (préliminaire)	48
L24a Couplage des modèles et formulation d'indicateurs en interaction avec la tâche de co-conception pour le pommier	24
L24b Couplage des modèles et formulation d'indicateurs en interaction avec la tâche de co-conception pour le pêcher (préliminaire)	36
L24c Couplage des modèles et formulation d'indicateurs en interaction avec la tâche de co-conception pour le manguier (préliminaire)	48
L25 Publication scientifique sur le modèle culture intégrant les effets de groupes fonctionnels de bioagresseurs du pommier	36
T3 – Co-conception	
L31 Typologie des pratiques culturelles	12
L32 Un ensemble de critères d'évaluation des performances	18
L33a Typologie des profils stratégiques d'acteurs : objectifs, stratégies, préférences entre critères d'évaluation pour le pommier	18
L33b Typologie des profils stratégiques d'acteurs : objectifs, stratégies, préférences entre critères d'évaluation pour le pêcher	33
L33c Typologie des profils stratégiques d'acteurs : objectifs, stratégies, préférences entre critères d'évaluation pour le manguier	46
L34a Rapport de l'atelier avec les acteurs et le retour d'expérience de ces derniers en vue de créer l'outil pour pommier	30
L34b Rapport de l'atelier avec les acteurs et le retour d'expérience de ces derniers en vue de créer l'outil pour pêcher	42
L34c Rapport de l'atelier avec les acteurs et le retour d'expérience de ces derniers en vue de créer l'outil pour manguier	48
L35 Publication scientifique IPSIM-QualITree et version préliminaire de l'outil (en lien avec la tâche 4)	40
L36 Séminaire de restitution/présentation de l'outil	48
T4 – Développement de l'outil	
L41 Rapport sur le choix et adaptation des algorithmes d'optimisation multicritère intégrant le domaine de décision et les indicateurs de performances spécifiques	12
L42 Rapport sur la mise à l'épreuve du cadre de la démarche de conception assistée par modèles et le choix/adaptation des méthodes d'aide à la décision et élicitation des préférences des acteurs. Cas du pommier	33
L43 Version préliminaire de l'outil pour le pommier	36
L44 V0 de l'outil sur pommier et pêcher (préliminaire)	40
L45 Intégration des retours sur V0 et diffusion de la V1 de l'outil	45
L46 Initiation éventuelle du cas manguier dans l'outil V2	48
L47 Transfert des résultats : Publication scientifique et articles de vulgarisation	48

Figure S10. Liste des livrables prévus.

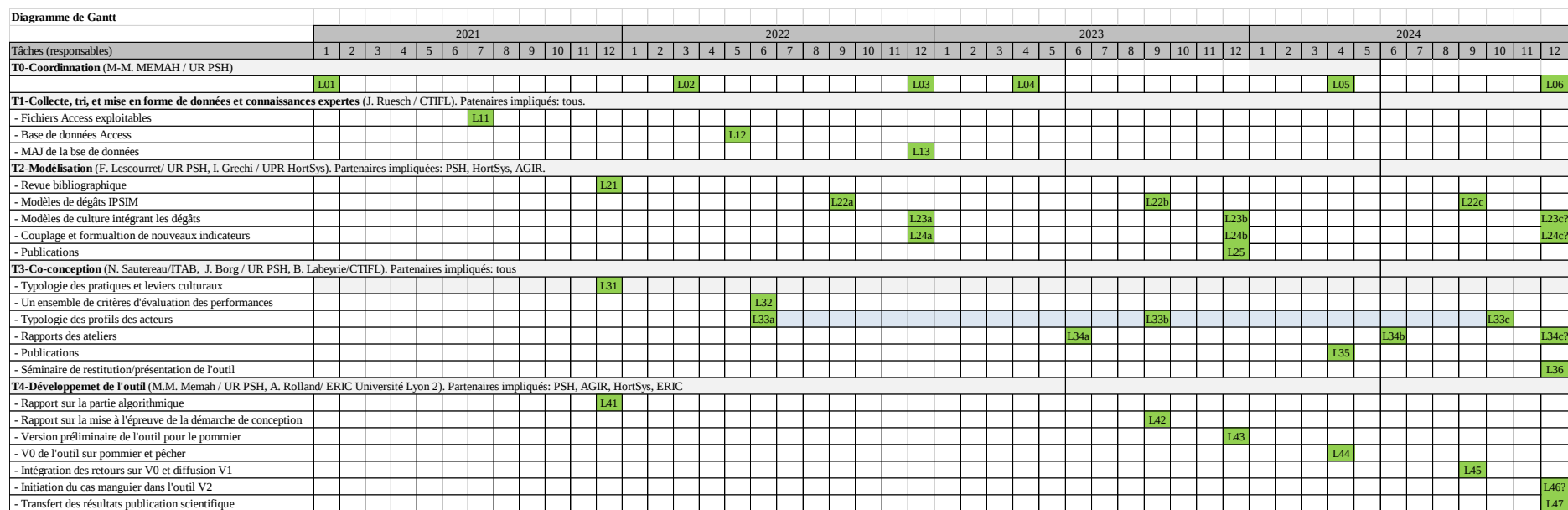


Figure S11. Calendrier prévisionnel du projet.