



PREPARE

Comprendre et PREdire les effets des PAYSAGES de pratiques sur la REGulation biologique

« Leviers Territoriaux pour réduire l'utilisation et les risques liés
aux produits phytopharmaceutiques »

Rapport final V1

Date de la version du rapport : 06/11/2023

Coordination : Sandrine PETIT MICHAUT, UMR Agroécologie, 17 rue Sully,
21000 DIJON sandrine.petit-michaut@inrae.fr

Partenaires :

UMR BAGAP, UMR DYNAFOR, UMR IGEPP, UR PSH, UMR SAVE

Auteurs : Sandrine Petit, Audrey Alignier, Stéphanie Aviron, Hugues Boussard
Pierre Franck, Caroline Gibert, Claire Lavigne, Sylvain Poggi, Benoit Ricci, Adrien
Rusch, Aude Vialatte, Juliette Young

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), de la Santé et de la Prévention, (MSP), et de la 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+

Table des matières

Contexte général et enjeux scientifiques et techniques	4
Objectifs généraux du projet.....	5
Quelques éléments de méthodologie	6
Résultats obtenus	6
Implications pratiques, recommandations, réalisations pratiques, valorisation.....	11
Valorisation.....	13
Résumés	16
RAPPORT SCIENTIFIQUE	19
Annexe : textes des publications	30
Annexe : partie confidentielle.....	Erreur ! Signet non défini.



PREPARE

Comprendre et PREdire les effets des PAYSages de pratiques sur la REgulation biologique

« Leviers Territoriaux pour réduire l'utilisation et les
risques liés aux produits phytopharmaceutiques »

Synthèse pour les décideurs V1

Date de la version du rapport : 06/11/ 2023

Coordination : Sandrine PETIT MICHAUT, UMR Agroécologie, 17 rue Sully,
21000 DIJON sandrine.petit-michaut@inrae.fr

Partenaires : UMR BAGAP, UMR DYNAFOR, UMR IGEPP, UR PSH, UMR
SAVE

Auteurs : Sandrine Petit, Audrey Alignier, Stéphanie Aviron, Hugues Boussard
Pierre Franck, Caroline Gibert, Claire Lavigne, Sylvain Poggi, Benoit Ricci, Adrien
Rusch, Aude Vialatte, Juliette Young

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), de la Santé et de la Prévention, (MSP), et de la 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+

Contexte général et enjeux scientifiques et techniques

L'adoption de systèmes agricoles plus favorables à la biodiversité pourrait contribuer à augmenter les services de régulation biologique des bio-agresseurs des cultures par leurs ennemis naturels et constituer une voie pour réduire l'usage des produits phytosanitaires, en accord avec les objectifs du plan Ecophyto II. Développer cette alternative nécessite de produire des estimations quantifiées des effets de la mobilisation de combinaisons de leviers de gestion sur le niveau de régulation des bio-agresseurs car c'est un argument majeur pour infléchir les décisions de gestion des agriculteurs.

PREPARE répond à l'enjeu majeur de quantification du gain à attendre de leviers territoriaux pour augmenter la régulation biologique et réduire l'utilisation de pesticides. Il s'appuie sur le suivi agroécologique d'un réseau de paysages initié par les équipes du consortium en 2014. Ce réseau national SEBIOPAG est constitué de cinq sites régionaux englobant de larges gammes de systèmes de production et de contextes paysagers, avec un total de 120 paysages étudiés annuellement en termes de régulation biologique¹ et auxiliaires, pratiques agricoles locales et caractéristiques paysagères (figure 1).

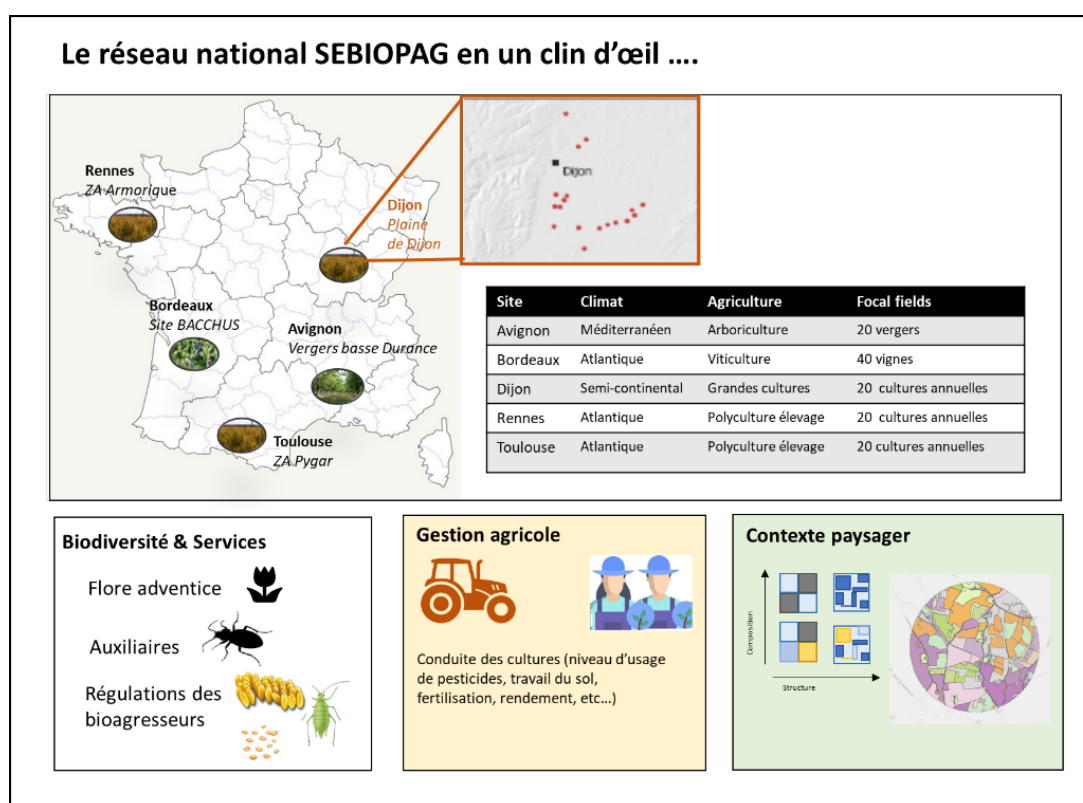


Fig 1. Les 5 sites régionaux sont composés de 20 (ou 40) parcelles qui sont suivies annuellement (Biodiversité et services, Gestion agricole, Contexte paysager) avec des méthodes et protocoles harmonisés sur le réseau.

¹ Dans PREPARE, le terme de 'régulation biologique' se réfère à la mesure de prédation de différentes proies sentinelles (pucerons, œufs de noctuelles, graines d'adventices) exposées dans les parcelles du réseau SEBIOPAG.

Objectifs généraux du projet

A l'origine du projet, nous avons fait le pari qu'un travail de co-construction avec les acteurs locaux autour des moyens de renforcer les **régulations biologiques (RB)** et de réduire l'utilisation de produits phytosanitaires était opportun dans les cinq sites régionaux de SEBIOPAG.

PREPARE proposait donc une analyse précise et située des effets de la mobilisation de différents leviers territoriaux sur la RB dans chacun des cinq sites régionaux de SEBIOPAG. La finalité était d'évaluer si et comment les leviers territoriaux peuvent être intégrés dans les modalités de gestion agricole par agriculteurs ou des acteurs institutionnels.

Plus spécifiquement, PREPARE avait pour objectifs de

- Développer des **modèles prédictifs** de niveaux de RB en réponse aux pratiques agricoles locales et territoriales.
- Proposer une démarche 'pilote' d'**animation participative** basée sur le développement d'un **outil de simulation spatialement explicite** dédié qui permet de visualiser les changements de pratiques territoriales et leurs effets sur la RB
- Explorer avec les acteurs différents scénarios de mobilisation de leviers (au niveau individuel ou collectif) en termes de gain de RB et identifier des **actions collectives** pour y parvenir.

La **démarche transdisciplinaire** mise en œuvre est détaillée dans la figure ci-dessous.

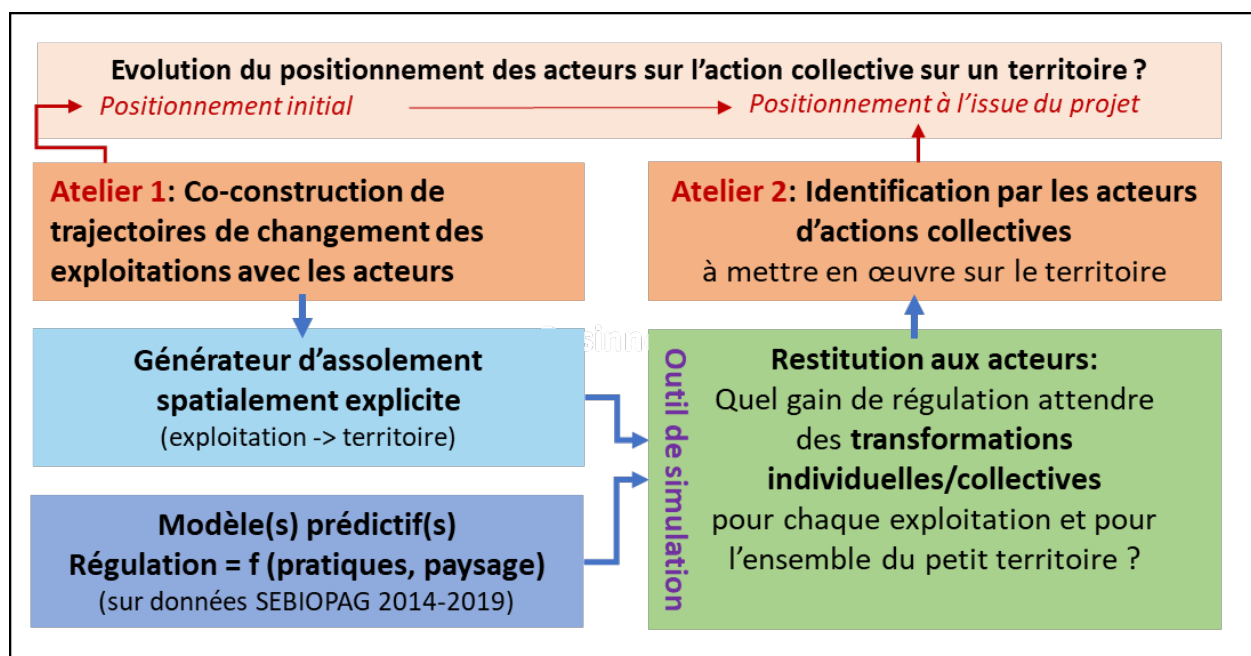


Fig. 2. PREPARE a développé une approche transdisciplinaire qui se compose d'actions interconnectées qui ont permis d'aller de l'Atelier 1 en début de projet (co-construction de scénarios de mobilisation de leviers territoriaux) à l'Atelier 2 en fin de projet (quelles actions collectives mettre en œuvre pour renforcer la RB).

Quelques éléments de méthodologie

- L'outil de simulation spatialement explicite allie deux composantes. La première est un générateur d'assolement qui permet de traduire des scénarios de changement de pratiques des exploitations d'un petit territoire en termes d'assolement. Les territoires de simulation de PREPARE s'étendent chacun sur 16km² et comprennent entre 10 et 20 exploitations. La seconde composante est un modèle prédictif de la RB, en réponse aux conditions météorologiques, à la gestion parcellaire (IFT pesticides) et paysagère (% habitats semi-naturels, diversité des assolements, % agriculture en AB, IFT pesticides à l'échelle du paysage). Les modèles ont été développés sur la base des données recueillies sur chaque site régional depuis 2014. L'outil de simulation qui en résulte prédit la RB en chaque point du territoire. Le détail est explicité dans le rapport scientifique PREPARE.
- La co-construction de scénarios avec les agriculteurs locaux (Atelier 1) et la restitution des résultats et l'identification d'actions collectives qui pourraient être mises en œuvre (Atelier 2) ont été facilitées et animées par SOLAGRO.
- La question du positionnement des acteurs sur l'action collective et d'une éventuelle évolution de ce positionnement suite au projet a mobilisé la Théorie du Comportement Planifié (TCP, Ajzen, 1985) et a été conduite par nos partenaires en sciences sociales. La TCP évalue par un jeu de questions les attitudes, les comportements et les normes par rapport à un comportement précis, ici « *agir collectivement à l'échelle du territoire pour renforcer les RB* ».

Résultats obtenus

La co-construction de trajectoires de changements

L'objectif était, à cette étape, d'identifier avec les agriculteurs locaux les combinaisons de leviers territoriaux considérés comme mobilisables afin de définir des scénarios territoriaux de réduction des pesticides pour les simulations. Pour rappel, les leviers territoriaux ciblés étaient (i) la pression phytosanitaire dans le paysage (proportion de surfaces en AB ou IFT moyen sur le paysage), (ii) la proportion d'habitats semi-naturels (de type IAE linéaire ou surfaciques) et (iii) la diversité spatio-temporelle des assolements.

Nous avons échangé avec un panel de 55 agriculteurs répartis sur les 5 sites, qui étaient de façon générale sensibilisés à la question de la RB des bioagresseurs. Près de 15% des agriculteurs avaient converti tout ou partie de leur exploitation en agriculture biologique depuis 2008. Seuls 10% des agriculteurs ont estimé que leur usage de produits phytosanitaires n'a pas été réduit depuis 2008. Près de 90% des agriculteurs ont implanté des IAE sur leur exploitation depuis 2008. Environ 85% des répondants envisagent des modifications de pratiques sur leur exploitation dans les 5 années à venir. Parmi ceux-ci, 20% envisagent de mobiliser un seul levier (essentiellement l'implantation d'IAE) tandis que 80% vont mobiliser deux ou trois leviers. Pour les sites en cultures annuelles, la diversification (intégrer de nouvelles cultures dans l'assolement) est envisagée par la moitié des agriculteurs et quand elle n'est pas envisagée, c'est souvent parce que l'exploitant a déjà beaucoup diversifié ce qui laisse peu de marge de diversification.

Le dépouillement des ateliers et des questionnaires a permis d'identifier pour chaque site régional un scénario territorial qui rassemble plusieurs types de trajectoires

d'exploitations. Ces scénarios combinent souvent des exploitations qui se convertissent en AB et des exploitations qui diversifient leur assolement, avec réduction de 30% des IFT à l'échelle de l'exploitation.

Les modèles prédictifs de régulation

Dans PREPARE, la finalité était de fournir des prédictions adaptées à chacun des sites régionaux sur lesquels le consortium travaillait. Il n'était pas clair au début du projet si cet objectif pouvait être atteint avec un modèle prédictif générique unique, un modèle pour les cultures annuelles et un autre pour les cultures pérennes, ou à l'extrême un modèle issu uniquement des données spécifiques pour chaque site régional.

Nos résultats indiquent clairement que malgré l'exacte similitude des méthodes utilisées, les modèles explicatifs locaux (basés sur les données spécifiques au site régional) expliquent bien mieux les variations de RB que des modèles plus génériques. Si l'on exclut que ces différences sont d'origine méthodologique, on peut donc conclure que sur chacun des cinq sites régionaux, on observe des déterminants des variations de RB qui sont spécifiques à ce site. Ces résultats confortent l'idée que le contexte local est important en écologie. Ils indiquent que **les stratégies de gestion prometteuses pour renforcer les RB doivent être adaptées à des contextes spécifiques**. PREPARE nous a également montré que la valeur prédictive des modèles locaux est souvent faible et nous avons utilisé de nouvelles méthodes d'arbre de décision pour pallier cette limitation. Malgré ceci, seul un quart des modèles produisait des prédictions qui étaient bien validées (procédure de validation croisée spatialisée avec les données d'observation, cf rapport scientifique). Ainsi, on peut conclure de ce projet **qu'il est beaucoup plus difficile de prédire la RB que d'en expliquer les déterminants**. Ceci nous a amené à présenter avec prudence les sorties des modèles lors des ateliers avec les agriculteurs et nous nous sommes plutôt attachés à présenter les tendances que les valeurs absolues de RB prédites.

L'outil de simulation et ses sorties

De multiples processus écologiques à l'échelle du champ et du paysage vont affecter les niveaux de RB dans une parcelle donnée. L'outil de simulation spatialisée proposé dans PREPARE était un élément que nous avons considéré primordial pour pouvoir communiquer aux acteurs l'importance de la dimension paysagère sur la RB. Notre hypothèse était qu'une visualisation cartographique des changements de pratiques et de leurs conséquences sur la RB serait un média particulièrement efficace. Le fait de travailler sur un territoire de simulation local, et donc bien connu des acteurs, devait également renforcer l'impact de notre outil.

PREPARE a permis de valider cette hypothèse. La présentation des sorties de simulations pendant les deuxièmes ateliers a généré une écoute très attentive, une bonne compréhension des résultats et de leurs implications pour chacun et pour tous, et notamment de l'intérêt à agir collectivement sur le territoire. L'approche ou les résultats présentés n'ont fait l'objet d'aucune remise en cause de la part des acteurs.

Le format de restitution des sorties de simulations s'est également enrichi pendant le projet. Nous avons présenté les cartes présentant les niveaux de RB sur le territoire, avant et après mobilisation de leviers territoriaux (Figure 3). Néanmoins, les effets 'paysagers' sont aussi interprétés par la grande majorité des acteurs par le fait que **les agriculteurs sont interdépendants pour la fourniture de RB dans leurs champs respectifs**. Ce point était très clairement ressorti du premier atelier, avec 90% des

agriculteurs conscients que leur choix de conduite de cultures a des effets sur la RB au-delà des limites de leur exploitation, et que les choix de leurs voisins exploitants peuvent affecter la RB sur leur exploitation. C'est ce qui nous a amené à enrichir notre restitution en mettant aussi l'accent sur la quantification des 'conséquences' de changement ou de non changement, pour soi-même et pour chaque exploitant du petit territoire (Figure 4). Au final, l'outil quantifie le degré d'interdépendance entre voisins et la conséquence des décisions individuelles sur chacun, plutôt que des prévisions de gains absolus en termes de RB.

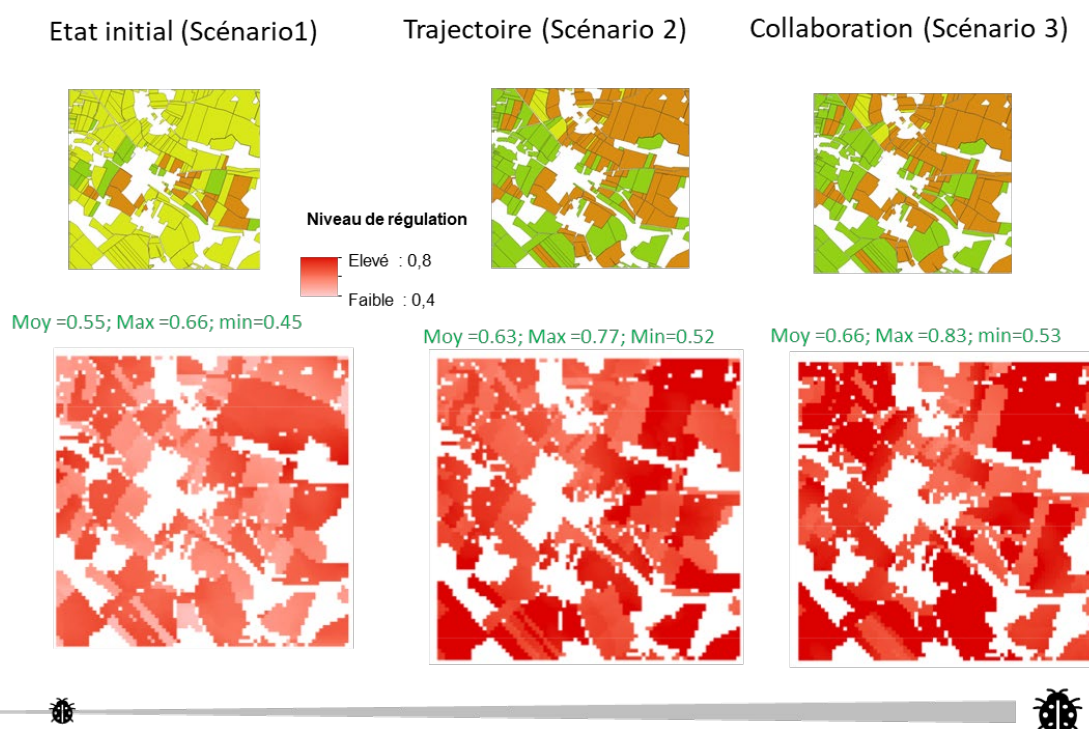


Fig 3. Exemple de sortie 'brute' de l'outil de simulation pour les trois scénarios décrits (territoire sur le site régional de Dijon). Ligne du haut = cartographie du parcellaire (3 types de conduite de culture : vert clair = conventionnel avec rotations simples, orange = conventionnel avec rotations diversifiées et IFT réduit de 30%, vert foncé = agriculture biologique); Ligne du bas = évaluation du niveau de RB pour chaque pixel du territoire.

Enfin, les deuxièmes ateliers se sont révélés extrêmement constructifs et fluides. On pouvait craindre que les résultats présentés ne génèrent que des réactions peu constructives chez les acteurs, par exemple le sentiment que si les décisions des voisins impactent négativement chacun, à quoi bon essayer d'être vertueux soi-même ou bien encore qu'il peut être 'profitable' finalement de ne pas modifier ses pratiques mais plutôt de laisser ses voisins s'engager dans ces changements et d'en tirer des bénéfices sans rien investir soi-même (stratégie du 'passager clandestin'). Nous n'avons pas observé ce type de réaction, même si dans de rares cas une frustration du type 'moi je fais bien mais les autres non' a pu être exprimée. De fait, la présentation a assez spontanément suscité des échanges sur les idées de 'communiquer, partager, réfléchir ensemble'. Nous avons ainsi été témoin d'un passage très naturel sur les échanges autour de l'identification d'actions collectives qui seraient pertinentes sur le territoire. En ce sens, nous avons constaté que **l'outil de simulation tel que mobilisé dans le projet PREPARE a joué le rôle d'outil de médiation**. En effet, l'action collective était une dimension mineure et peu familière pour les acteurs locaux sur de

nombreux sites régionaux, notamment pour les sites en cultures annuelles. Pourtant, à l'issue du projet et à la suite de la restitution des résultats, de nombreuses idées d'actions collectives ont été spontanément avancées par les agriculteurs sur chacun des sites. Les votes ont aussi démontré un certain consensus local sur les actions prioritaires, c'est-à-dire les plus pertinentes à initier localement

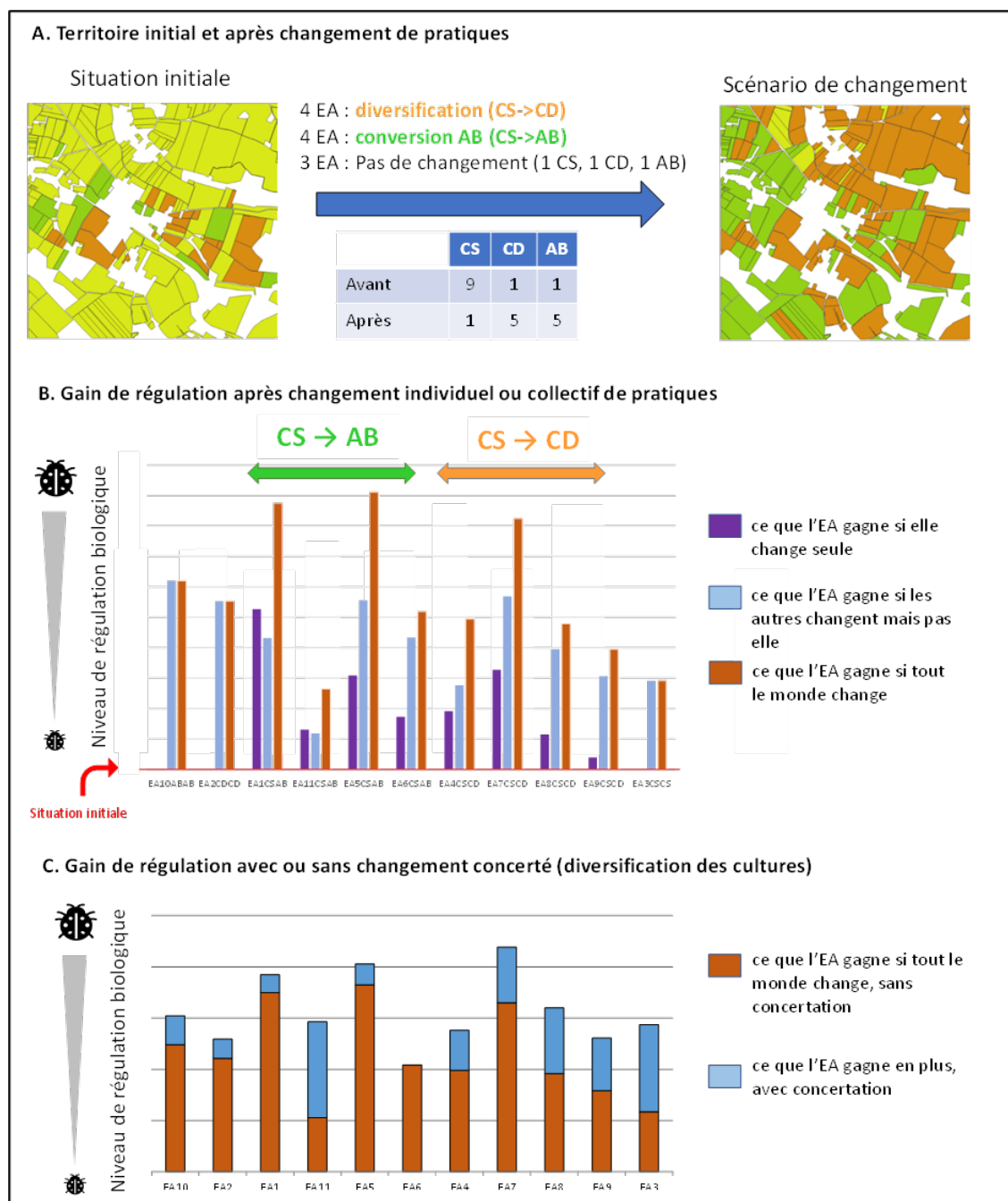


Fig. 4. Restitution des simulations de type 'interdépendance entre acteurs'. On met l'accent sur les gains de RB à attendre de changements individuels, généralisés ou concertés pour chaque exploitant du territoire. CS : conventionnel simple, CD : conventionnel diversifié, AB : agriculture biologique.

Les actions collectives

Il est souvent avancé que les décisions non coordonnées risquent de ne pas produire les avantages escomptés à l'échelle du paysage (Landis et al., 2017) et que la transition agroécologique nécessite des innovations au niveau du paysage et des mécanismes de coordination entre les agriculteurs (Duru et al., 2015).

En termes de positionnement, les questionnaires remplis par les participants aux Ateliers 1 et 2 nous indiquent que **les agriculteurs voient d'un œil favorable les actions collectives et que cela s'est accentué entre le début et la fin du projet**. L'affirmation "il est bénéfique pour les exploitants d'agir collectivement" est approuvée ou fortement approuvée par 74 % des agriculteurs lors du premier atelier et par 90 % des agriculteurs lors du deuxième atelier. L'affirmation "Travailler collectivement dans les territoires permet de réduire les coûts de la mise en place des pratiques à l'échelle de l'exploitation donc augmente les chiffres d'affaires" est approuvée ou fortement approuvée par 53 % des agriculteurs lors du premier atelier et par 69 % des agriculteurs lors du deuxième atelier. Les personnes les plus influentes pour la décision d'un exploitant à s'engager dans une action collective sont les agriculteurs voisins (44% et 20% dans le premier et le deuxième atelier respectivement) et les Chambres d'Agriculture ou d'autres structures de conseil (5% et 24% dans le premier et le deuxième atelier respectivement). **Néanmoins, les agriculteurs sont largement d'accord sur le fait qu'il est difficile de travailler collectivement et cela n'a pas évolué au cours du projet**. En effet, moins d'un tiers des agriculteurs étaient d'accord avec l'affirmation "il est facile pour moi d'agir collectivement dans la mise en place de nouvelles pratiques", lors de l'Atelier 1 comme lors de l'Atelier 2.

Pour autant, les participants de l'Atelier 2 (agriculteurs et institutionnels) sur chaque site régional ont très spontanément échangé entre eux et identifié un certain nombre d'actions collectives qui seraient pertinentes dans leur contexte. Pour chaque site, nous avons retenu les deux actions qui ont reçu l'adhésion du plus grand nombre dans nos ateliers. Pour chaque proposition jugée pertinente localement, les acteurs ont identifié des freins à la mise en œuvre de ces actions collectives, mais aussi évoqué les leviers qui permettraient de lever ces freins.

Le tableau 1 présente les sorties des Ateliers 2 pour les trois sites régionaux de cultures annuelles, avec plusieurs points. La première action collective identifiée et plébiscitée concerne la diversification des rotations, avec des actions collectives plus ou moins ambitieuses allant de 'discuter et être conseillés ensemble' à Dijon jusqu'à 'former un GIEE pour un assolement commun' à Toulouse. Un autre point commun qui était peu attendu concerne le sentiment de beaucoup d'acteurs d'être isolé des autres acteurs de leur territoire et le désir de mieux connaître et communiquer avec les acteurs de leur petit territoire. Ils ont exprimé le fait qu'il n'existe pas de structure ou d'initiatives pour ces échanges et proposent quelques pistes. Par exemple, si de nombreux participants aux ateliers sont investis dans différents groupements, ces derniers ne rassemblent pas les différents modes de production du territoire (par exemple AB et non AB).

Les leviers identifiés par les acteurs comme importants à actionner pour faciliter la mise en œuvre d'actions collectives ont pu être classés dans trois catégories

- (i) bénéficier d'accompagnement technique,
- (ii) bénéficier d'un soutien financier
- (iii) apporter des changements aux politiques publiques actuelles

	Dijon	Rennes	Toulouse
Participants	9 exploitants, 6 institutionnels	6 exploitants, 2 institutionnels	10 exploitants, 3 institutionnels
Enjeux territoriaux autre que la RB	Changement climatique	Biodiversité et eau, Qualité des produits	Maintien de l'élevage, Limitation érosion des sols
Réaction face aux résultats PREPARE	Positive	Positive mais frustration (voisins peu vertueux)	Positive mais frustration (voisins, réglementations contradictoires)
Solutions/objectifs	Adapter les rotations au CC et les diversifier	Remettre des IAE, réduire la taille des parcelles	Maintenir prairies et haies, planter des IAE
Action collective Prioritaire 1	Diversification rotations (8)	Implantation de haies, Diversification : allongement de la rotation	Création d'un GIEE assolement commun
Action collective Prioritaire 2	Créer une structure d'échange rassemblant tous les acteurs du petit territoire	Mettre en place une 'Pédagogie du talus' : communiquer et échanger pour éviter le clivage AB/non AB	Diffuser l'importance de l'interdépendance entre voisins au sein de la profession
Levier 'Accompagnement technique'	Oui (diversification) –Coop. pour coordonner les expérimentations	Formations, système pour assurer un tuilage entre générations	
Levier 'Soutien financier'	Prise de risque, Compensation du temps qui serait dédié au collectif	Paieement pour services écologiques	Animation de collectifs type GIEE Prise de risque
Levier 'Politiques publiques à l'échelle territoire'	Engendrer une dynamique multi-enjeux cohérente dans les petites régions	Assurer la cohérence entre travaux/initiatives sur le territoire (multi-enjeux) Réglementation bottom-up sur le territoire ?	Inciter les coop. à développer des filières et débouchés adaptés

Tableau 1. Caractéristiques des Ateliers 2 sur les sites régionaux en grandes cultures et polyculture-élevage. Sont répertoriées les actions collectives identifiées par les acteurs qui ont recueilli le plus de soutien lors de l'Atelier, et les leviers pour lever des freins techniques, organisationnels et institutionnels.

Implications pratiques, recommandations, réalisations pratiques, valorisation

Implications pratiques :

Le projet PREPARE démontre qu'une mobilisation de leviers territoriaux adaptée au contexte local et conçue avec les agriculteurs locaux devrait permettre d'augmenter les RB.

Si la nature exacte des relations entre facteurs de gestion et niveaux de RB varie en fonction des situations locales, on identifie bien que la réduction de l'utilisation de pesticides et la diversification des assolements sur un territoire renforcent les RB. On aurait donc un cercle vertueux de baisse d'IFT (via des conversions en AB ou via une diversification des rotations) qui amène à une augmentation de la RB, qui à terme pourrait permettre de réduire encore l'IFT à l'échelle territoriale.

Renforcer les RB pour réduire l'utilisation de pesticides est beaucoup plus efficace si les changements de pratiques sont généralisés à l'échelle du territoire, voir développés de façon concertée entre agriculteurs. L'utilisation de l'outil de simulation a permis d'illustrer aux agriculteurs dans quelle mesure les actions des uns et des autres agissaient sur chacun et sur tous sur leur territoire.

L'action collective apparaît comme beaucoup plus efficace pour assurer une transition des pratiques agricoles à l'échelle du territoire, une échelle pertinente pour de nombreux processus écologiques. Les agriculteurs impliqués dans PREPARE voient d'un œil favorable le principe d'actions collectives sur leur territoire. Pour autant, une vaste majorité considère que la mise en œuvre de telles actions serait probablement difficile. Ils pointent des verrous techniques, organisationnels et institutionnels. Le sentiment qui prévaut est que les actions collectives territoriales ne sont ni encouragées, ni accompagnées sur nos territoires d'étude.

Recommandations

Les acteurs locaux qui ont participé à nos ateliers (agriculteurs, institutionnels divers) ont exprimé divers points de vue. Le petit territoire est une entité importante pour la plupart des agriculteurs et beaucoup sont prêts à mieux l'intégrer dans leur fonctionnement et leurs prises de décision. Ils identifient cependant des conditions préalables :

- *Travailler le lien territorial ou repenser les réseaux d'échanges à une échelle territoriale* : On peut identifier dans les témoignages différentes formulations : diversifier ses interlocuteurs, intégrer tous les acteurs d'un même territoire, décloisonner les types d'agriculture, évoquer collectivement la question des 'biens communs', discuter ensemble de changement générationnel et de solidarité agricole. Ici se pose la question de comment engager l'émergence de ces réseaux d'échanges (qui est en charge de cette animation territoriale?)

- *Considérer le territoire comme porteur d'enjeux multiples* : Les témoignages montrent une attente forte autour de la prise en compte simultanée des différents enjeux auxquels doivent faire face les acteurs d'un même territoire (par exemple réduction pesticide ET changement climatique à Dijon ou réduction pesticide ET maintien de l'élevage à Toulouse). Ceci vient notamment du sentiment que chaque enjeu est actuellement traité de façon isolée, avec parfois des réglementations/conseils/injonctions/incitations qui peuvent sembler dissociés voire contradictoires. Engager une démarche territoriale multi-enjeux aurait plus de sens pour les acteurs et permettrait de clarifier/hiérarchiser les changements de pratiques à mettre en œuvre, individuellement et collectivement. Ce point nécessiterait un effort d'intégration important en termes de politiques publiques, a minima une approche/réflexion plus transversale et intégrative, adaptée au contexte local et aux attentes des acteurs.

Ces deux aspects sont cruciaux, et ils nécessitent du temps de la part des acteurs (agriculteurs) et de l'accompagnement pour passer à l'action.

Limites ou généralisations éventuelles des résultats :

Si la démarche proposée par le projet PREPARE a apporté de nombreuses réponses sur les déterminants de la RB et a permis d'engager de vraies réflexions avec les acteurs locaux sur les paysages de pratiques (ou pratiques territoriales), nous nous sommes heurtés à la difficulté d'obtenir des modèles prédictifs correctement validés. Pour autant, il nous semble que les modèles validés pourraient être applicables dans des contextes de production comparables à certains de nos sites régionaux. Cela reste à vérifier mais il nous semble intéressant de mobiliser l'outil de simulation pour engager

la réflexion avec d'autres groupements d'agriculteurs sur les verrous et leviers au développement d'actions collectives. Cette démarche permettrait d'enrichir le panorama d'action collectives identifiées par les acteurs ainsi que la palette de leviers à actionner pour favoriser les actions collectives territoriales.

Valorisation

La liste complète des productions est présentée dans la section suivante.

La démarche transdisciplinaire mise en œuvre dans PREPARE a fait l'objet de plusieurs présentations scientifiques dans des colloques internationaux (Landscape 2021 Congress ; Annual meeting GFO en 2023) et nationaux (FRB Scénarios territoriaux en 2023). Elle a fait l'objet d'un article dédié dans *Agriculture, Ecosystems & Environment* (10.1016/j.agee.2022.108263). *Nous projetons la soumission d'autres publications académiques (i) sur les scénarios évalués (courant 2024) et (ii) sur la question de l'action collective (qui nécessitera sans doute de mobiliser l'outil de simulation avec d'autres groupes d'agriculteurs).*

La démarche et les résultats du projet ont aussi été présentés dans différentes rencontres professionnelles (séminaire interne de l'OFB, Séminaire du RMT Champs et Territoires Ateliers). *Nous avons le projet de réaliser une vidéo qui présente le projet, et notamment les sorties de l'outil de simulation.* Cette vidéo pourra être hébergée sur la Plateforme OSAE.

Liste des opérations de valorisations issues du contrat (articles de valorisation, participation à des colloques, enseignement et formation, communication, expertises...)

Publications dans des revues scientifiques internationales

- Petit, S., Alignier, A., Allart, R., Aviron, S., Boussard, H., Franck, P., Gibert, C., Ladet, S., Lavigne, C., Lecuyer, L., Moncamp, M., Muneret, L., Poggi, S., Ricci, B., Rusch, A., Vialatte, A., Young, J. (2023) *Building capacities for the design of agroecological landscapes: the added-value of Landscape Monitoring Networks*. *Agriculture, Ecosystems & Environment*. 342, pp.108263. 10.1016/j.agee.2022.108263 (<https://hal.inrae.fr/hal-03853832>)
- Jeanneret Ph, Aviron S., Alignier A., Lavigne C., Helfenstein J., Herzog F., Kay S., Petit S. (2021) *Agroecology landscapes*. *Landscape Ecology*, Springer Verlag, 2021, 36 (8), pp.2235-2257. 10.1007/s10980-021-01248-0. (<https://hal.inrae.fr/hal-03534493>)

Colloques scientifiques

- Petit, S. et consortium PREPARE (2023) *Agroecology in action: engaging with stakeholders to move towards pesticide-free landscapes*. Invited talk, GfÖ annual meeting, Leipzig 11-15 Septembre 2023
- Petit, S. et consortium PREPARE (2023) *Approches et outils: Un exemple mobilisant la modélisation: le projet PREPARE*. Communication invitée: Atelier 'Scénarios territoriaux et trajectoires de transitions: quelles recherches transdisciplinaires' organisé par la FRB et Futurearth. Paris, 8 Juin 2023.
- Aviron, S., Lucas, V. (2023) *Quelles conditions écologiques et sociales pour favoriser la transition agroécologique des exploitations agricoles ?* Séminaire de l'axe ressources de l'Observatoire des Sciences de l'Univers de Rennes, 8 février 2023.
- Franck, P., Lavigne, C., Thomas, C. (2022) *Impact des pratiques phytosanitaires et du paysage sur la prédation des ravageurs en vergers de pommiers en Basse Vallée de la Durance*, présenté à Séminaire du réseau EMBA: Contrôle Biologique par Conservation, Avignon, 15/11 2022. <https://www6.inrae.fr/emba>.
- Petit, S. et consortium PREPARE (2021) *Exploring the potential of co-designed landscapes to promote biological pest control*. Landscape 2021, Berlin, 20-22 Sept 2021. (<https://hal.inrae.fr/hal-03544323>)
- Franck, P. et consortium PREPARE (2019) *Démêler les effets des pratiques agronomiques locales des effets du paysage agricole sur le contrôle biologique des bioagresseurs dans les cultures*. Antibes, France, 29/05 2019. <https://colloque.inrae.fr>
- Franck, P. et consortium PREPARE (2019) *Disentangling local agronomic practices from agricultural landscape effects on pest biological control*. In Meetings of IOBC-Working Group Landscape management for functional biodiversity, Vol. 143. Proceedings of the meeting of IOBC-Working Group Landscape management for functional biodiversity, March 27 - 29, 2019. Wageningen, Netherlands: IOBC-WPRS Bulletin, 2019. <https://hal.inrae.fr/hal-02946652>.

Méthodologie

- Ricci, B. 2021 Le package alm : principes et applications. Présentation au Groupe de Travail STEP 500 ENI. 12 Janvier 2021 (scientifiques, institutionnels (DGAL) et animateurs régionaux du réseau 500 ENI. (souvent chambres d'agriculture)
- Allart, R., Ricci, B., Poggi, S. 2021. Procédure alm de cartographie automatique du paysage. Cahiers des Techniques de l'INRA, INRA, 2021, 103, pp.12 https://www6.inrae.fr/cahier_des_techniques/Les-Cahiers-parus/Les-N-reguliers/2021/Cahier-N-103/Art1-ct103-2021. (hal-03151041)
- Allart, R., Ricci, B., Poggi, S. 2021. Procédure alm et package finalisés : Disponible sur Data INRAE : <https://data.inrae.fr/dataset.xhtml?persistentId=doi:10.15454/AKQW7Y>

Diffusion vers la profession

- Petit et consortium PREPARE 2023 *Allier la co-construction de scénarios territoriaux et la modélisation prédictive pour renforcer la régulation biologique des bioagresseurs de cultures : Le projet PREPARE*. Journée 'Comprendre le fonctionnement des territoire' Rencontres du RMT Champs & Territoires ateliers 'Les informations utiles à la fabrique de la transition agroécologique des territoires'. Paris, 12 Octobre 2023/

- Petit et al. 2023. *Réseau national SEBIOPAG: vers des approches territoriales*. Assemblée générale groupe thématique de l'OFB. UE2- plateforme CA-SYS. 23 Mars 2023.
- Petit, S. *Redesigning landscapes - Landscape levers to enhance natural pest control services in France*. Les dossiers d'Agropolis International - Special Partnership Issue, n° 26, September 2021. Agroecological transformation for sustainable food systems: Insight on France-CGIAR research, Agropolis International, p. 66, 2021, ISSN: 1628-4259. (10.23708/fdi:010082500). (hal-03446755)
- Petit, S., Lair, P. 2021. *Agroecology: fostering natural pest control services in arable agriculture*. The XXXI EURAGRI conference. Bringing science to society through co-innovation and co-creation - Sep 2021, Virtuel, Portugal. (hal-03585739)

Salons, journées techniques

- Petit, S. 2022. SEBIOPAG *Services écosystémiques associés à la biodiversité dans les paysages agricoles*. Les rencontres Inrae au SIA. Salon International de l'Agriculture. 4 Mars 2022. <https://www6.inrae.fr/rencontresia/Les-rencontres-2022/Agriculture-et-biodiversite>
- Franck, P. 2022 « *Imaginer les paysages de demain pour favoriser la biodiversité et les régulations biologiques en vergers: Quelles stratégie d'aménagement des paysages de vergers en Basse Vallée de la Durance ?* » Présenté à Journée Carpo', Avignon, France, 4 février 2022.
- Franck P. 2021 *Contrôle biologique des ravageurs des cultures: Interactions entre pratiques agronomiques locales et complexité des paysages agricoles. Association et diversification: des leviers depuis la parcelle jusqu'à l'échelle paysagère*. Avignon, France: Salon Med'Agri, 2021. <https://www.youtube.com/watch?v=EYuUccroLNw>.
- Lavigne, C., Franck P., 2023. *Impact de la composition des paysages et des pratiques sur la prédation des ravageurs en vergers de la basse vallée de la Durance*. Séminaire Diversifier les systèmes de culture pour les rendre plus agroécologiques, UMT SiBio, octobre 2023, Avignon.

Résumés

☐ Résumé court

PREPARE explore avec les acteurs locaux les effets de scénarios territoriaux de changements de pratiques (diversification, conversion en AB ou réduction des pesticides) sur la régulation biologique. Les simulations illustrent la grande interdépendance entre agriculteurs d'un territoire et démontrent le bénéfice pour chacun à s'engager collectivement dans les changements de pratiques favorables aux régulations biologiques.

□ Résumé long

- Contexte général et enjeux scientifiques et techniques

L'adoption de systèmes agricoles plus favorables à la biodiversité pourrait contribuer à augmenter les services de régulation biologique des bio-agresseurs des cultures par leurs ennemis naturels et constituer une voie pour réduire l'usage des produits phytosanitaires, en accord avec les objectifs du plan Ecophyto II. Développer cette alternative nécessite de produire des estimations quantifiées des effets de la mobilisation de combinaisons de leviers de gestion sur le niveau de régulation des bio-agresseurs car c'est un argument majeur pour infléchir les décisions de gestion des agriculteurs.

- Objectifs

Sur la base de données agronomiques, paysagères et de mesures de régulation biologique effectuées annuellement depuis 2014 sur 120 paysages du réseau SEBIOPAG, PREPARE a développé une analyse située des effets de la mobilisation de différents leviers territoriaux sur la régulation biologique dans cinq sites régionaux. La finalité était d'évaluer si et comment ces leviers peuvent être intégrés dans les modalités de gestion agricole par les agriculteurs ou les acteurs institutionnels. La **démarche transdisciplinaire** adoptée dans PREPARE visait à (i) développer des **modèles prédictifs** des niveaux de régulation en réponse aux pratiques agricoles locales et territoriales, (ii) proposer une démarche 'pilote' d'**animation participative** basée sur le développement d'un **outil de simulation spatialement explicite** dédié qui permet de visualiser les changements de pratiques territoriales et leurs effets sur la régulation et (iii) explorer avec les acteurs différents scénarios de mobilisation de leviers (aux niveaux individuel ou collectif) en termes de gain de régulation biologique et identifier des **actions collectives** pour y parvenir.

- Méthodologie

Les scénarios de mobilisation de leviers territoriaux ont été co-construits avec les acteurs locaux sur chaque terrain d'étude en début de projet. Des modèles prédictifs de la régulation en réponse aux conditions météorologiques, à la gestion parcellaire et aux paysages ont été développés sur la base des données du réseau SEBIOPAG. L'outil de simulation développé permet de combiner des assolements issus de scénarios territoriaux de changement pratiques et les modèles prédictifs de la régulation. Les sorties de l'outil sont (i) la distribution spatiale des niveaux de régulation sur le territoire et (ii) les gains de régulation de chaque exploitation du territoire en réponse à des changements de pratiques individuels ou collectifs. Les résultats ont été restitués aux acteurs de chaque site, puis les acteurs ont identifié ensemble des actions collectives pertinentes à mettre en œuvre sur leur territoire, et les leviers qui leur permettraient d'y parvenir.

- Principaux résultats obtenus

- Pour chaque site régional, un scénario territorial a été co-construit, qui rassemble plusieurs types de trajectoires d'exploitations. Les scénarios combinent souvent des exploitations qui se convertissent en AB et des exploitations qui diversifient leur assolement, avec une réduction de 30% des IFT.

- Obtenir des modèles prédictifs quantitatifs validés s'est révélé difficile, malgré les jeux de données disponibles.
- Les modèles prédictifs développés indiquent qu'une mobilisation de leviers territoriaux adaptée au contexte local et conçue avec les agriculteurs locaux permet d'augmenter les régulations biologiques.
- L'utilisation de l'outil de simulation a permis d'illustrer aux agriculteurs dans quelle mesure les actions des uns et des autres agissent sur chacun et sur tous (interdépendance entre acteurs du territoire) .
- Renforcer les régulations pour réduire l'utilisation de pesticides est beaucoup plus efficace si les changements de pratiques sont généralisés à l'échelle du territoire, voir développés de façon concertée.
- Les agriculteurs impliqués dans PREPARE voient d'un œil favorable le principe d'actions collectives sur leur territoire. Pour autant, une vaste majorité considère que la mise en œuvre de telles actions serait probablement difficile. Les institutionnels présents dans les ateliers ont le même positionnement
- Les acteurs locaux ont néanmoins identifié des actions collectives pertinentes qui seraient prioritaires à mettre en œuvre sur leur territoire. Ils décrivent les freins techniques, organisationnels et institutionnels actuels et les leviers à actionner pour lever ces freins .

- Sorties opérationnelles pour décideurs, applications éventuelles

- La réduction de l'utilisation de pesticides et la diversification des assolements sur un territoire renforcent les régulations. On aurait donc un cercle vertueux de baisse d'IFT (via des conversions en AB ou via une diversification des rotations) qui amène à une augmentation de la régulation, qui à terme pourrait permettre de réduire encore l'IFT territorial.
- Renforcer les régulations pour réduire l'utilisation de pesticides est beaucoup plus efficace si les changements de pratiques sont généralisés à l'échelle du territoire, voir développés de façon concertée.
- Les agriculteurs voient l'intérêt à transformer leurs pratiques collectivement pour augmenter les régulations voire de répondre en même temps à d'autres enjeux, mais considèrent que les moyens et l'accompagnement de cette démarche ne sont pas au rendez-vous sur leur territoire.
- Il y a des attentes communes sur l'ensemble des sites régionaux étudiés (i) que le territoire soit considéré comme porteur d'enjeux multiples pris en compte de façon intégrée (ii) que du lien territorial soit créé, en repensant les réseaux d'échanges à l'échelle du petit territoire

- Recommandations

Le territoire est un niveau d'organisation écologique et social qui semble encore trop peu mobilisé pour engager la transition vers des systèmes agricoles économes en pesticides. Le projet PREPARE montre la pertinence de cette échelle pour des processus écologiques tels que la régulation biologique ; il montre aussi que les acteurs du territoire y voient un espace d'interdépendances entre acteurs sur de multiples enjeux. Il semble important de mettre en place les mesures facilitant la mise en œuvre d'actions collectives co-construites à l'échelle de petits territoires.

□ Mots-clés : acteurs, interdépendance, action collective, modèle prédictif, paysage.



RAPPORT SCIENTIFIQUE

PREPARE

Comprendre et PREdire les effets des PAYSAGES de pratiques sur la REGulation biologique

« Leviers Territoriaux pour réduire l'utilisation et les
risques liés aux produits phytopharmaceutiques »

Rapport final V1

Date de la version du rapport 06/11/2023

Coordination : Sandrine PETIT MICHAUT, UMR Agroécologie, 17 rue Sully,
21000 DIJON sandrine.petit-michaut@inrae.fr

Partenaires : UMR BAGAP, UMR DYNAFOR, UMR IGEPP, UR PSH, UMR
SAVE

Auteurs : Sandrine Petit, Audrey Alignier, Stéphanie Aviron, Hugues Boussard
Pierre Franck, Caroline Gibert, Claire Lavigne, Sylvain Poggi, Benoit Ricci, Adrien
Rusch, Aude Vialatte, Juliette Young

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), de la Santé et de la Prévention, (MSP), et de la 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+

Ce rapport scientifique détaille la méthodologie utilisée pour le développement de (i) modèles explicatifs et prédictifs de la régulation biologique et de (ii) l'outil de simulation et comment il est mobilisé dans PREPARE. Les résultats obtenus sont synthétisés dans la partie synthèse du rapport final et sont présentés en détail dans le rapport complet fourni en annexe.

1. Comprendre et prédire la régulation biologique

1.1 Jeu de données étudié

Identifier les conditions favorables aux régulations biologiques des bioagresseurs requiert de pouvoir étudier comment l'intensité de ces régulations biologiques varie en fonction de gradients de pratiques et de paysages. Dans un premier temps, il s'agit de structurer et d'analyser des jeux de données pour établir des relations statistiques entre l'intensité des régulations biologiques et des covariables décrivant les pratiques agricoles et le paysage (étape 1 d'ajustement de modèles statistiques). Dans un second temps, si les modèles statistiques établis sont suffisamment robustes pour être utilisés à des fins de prédiction, il devient alors possible de simuler au sein d'un territoire comment des changements de pratiques et/ou de caractéristiques paysagères (dans la mesure des gammes de variations utilisées pour ajuster les modèles) vont influencer l'intensité des régulations biologiques (étape 2 de simulation). Si la première étape correspond à une analyse assez classique en écologie, la seconde a rarement été mise en œuvre à grande échelle avec des données réelles sur la question des régulations biologiques. Dans le projet PREPARE, nous avons cherché à conduire ces deux étapes en valorisant un jeu de données remarquable par son ampleur (~100 parcelles suivies sur plusieurs années) et son étendue (échelle nationale). Le jeu de données mobilisées dans PREPARE regroupe cinq sites d'études combinant les réseaux SEBIOPAG et BACCHUS et couvre une grande diversité de cultures annuelles et pérennes et de type de paysages, et un large gradient d'intensité d'utilisation des intrants, notamment des pesticides.

Mesures de régulation biologique

Les régulations biologiques ont été estimées à l'aide de cartes de proies sentinelles, c'est-à-dire des cartes sur lesquelles sont fixées des proies correspondant à des bioagresseurs, et exposées dans des parcelles agricoles.

La proportion de proies consommées (taux de prédation) constitue une mesure du potentiel de régulation biologique. Sur l'ensemble des cinq sites, cette mesure a été effectuée sur 80 à 100 parcelles chaque année pendant six ans sur la période 2014-2019. Cinq types de proies sentinelles ont été utilisées : sur les 80 parcelles SEBIOPAG : des pucerons et des graines d'adventices au sol, des pucerons et des œufs de lépidoptère (*Ephestia kuehniella*) dans la culture ; sur les 20 parcelles BACCHUS : des graines d'adventices et des œufs du lépidoptère *Lobesia botrana*. La

Figure 1 illustre la variabilité du taux de prédation au sein de chacun des sites chaque année toutes proies confondues.

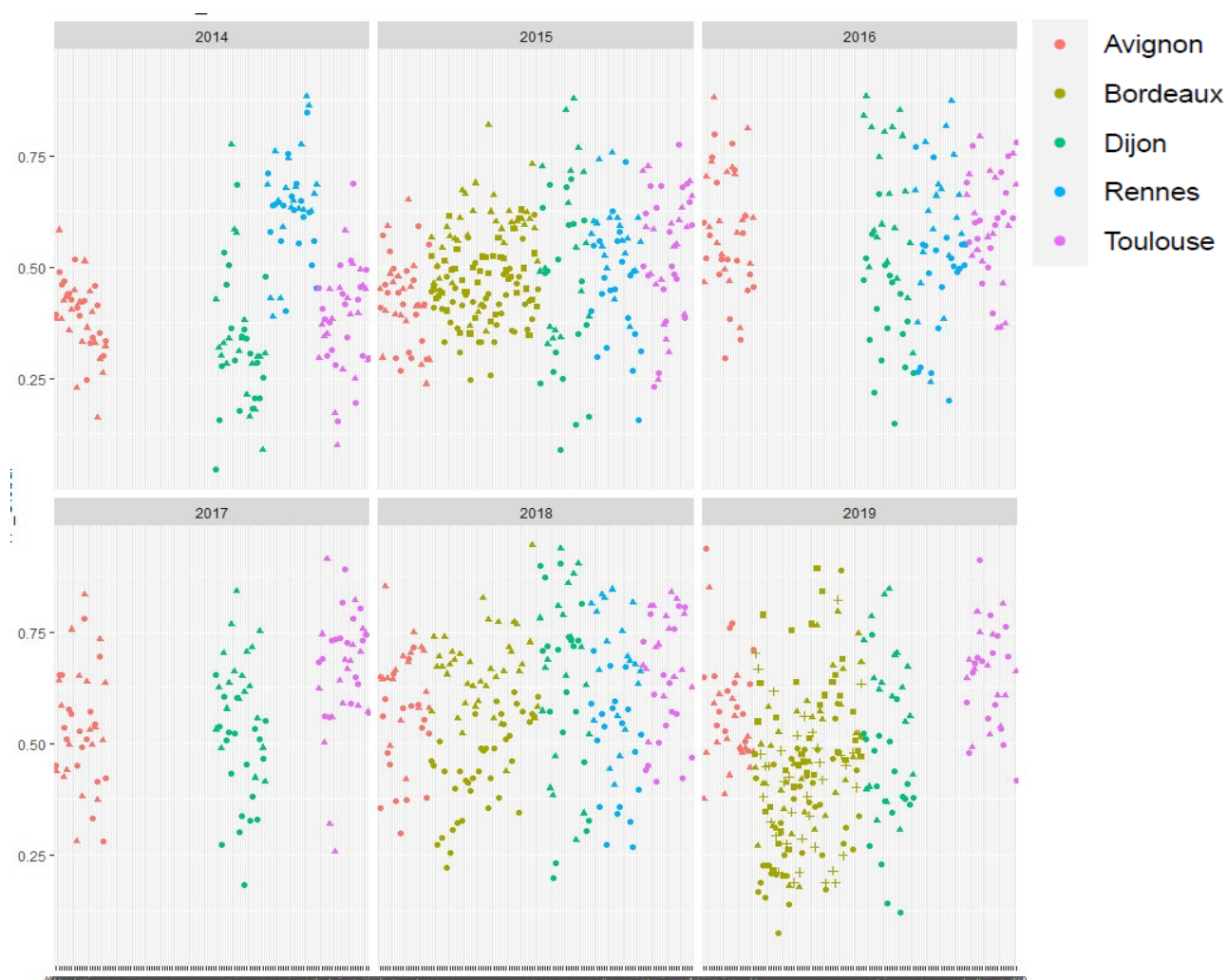


Fig. 1: Potentiels de régulation (taux de prédation moyens) mesurés sur les parcelles des 5 sites sur les 6 années de la période 2014-2019 (1 point = moyenne pour 1 parcelle)

Une méthode harmonisée de cartographie du paysage

Au niveau méthodologique, nous avons dû résoudre la question du développement d'une cartographie paysagère harmonisée entre sites et qui couvre des étendues spatiales potentiellement larges. Plus spécifiquement, il s'agissait d'unifier la nomenclature des occupations des sols, la méthodologie de cartographies de l'environnement des parcelles suivies et le calcul des métriques paysagères.

Nous avons choisi d'investir du temps dans le développement d'un package R permettant de rendre automatisable et reproductible la cartographie et le calcul de métriques en utilisant principalement des sources de données spatiales existantes (BD ORTHO, RPG, OSO – cf. Encadré ci-dessous). La méthodologie a été utilisée dans le projet à la fois pour la cartographie du paysage dans un rayon d'1 km autour des 100

parcelles suivies et pour la cartographie des territoires de simulation de 4 km sur 4 km (territoires de simulation). Le package ALM a été publié.

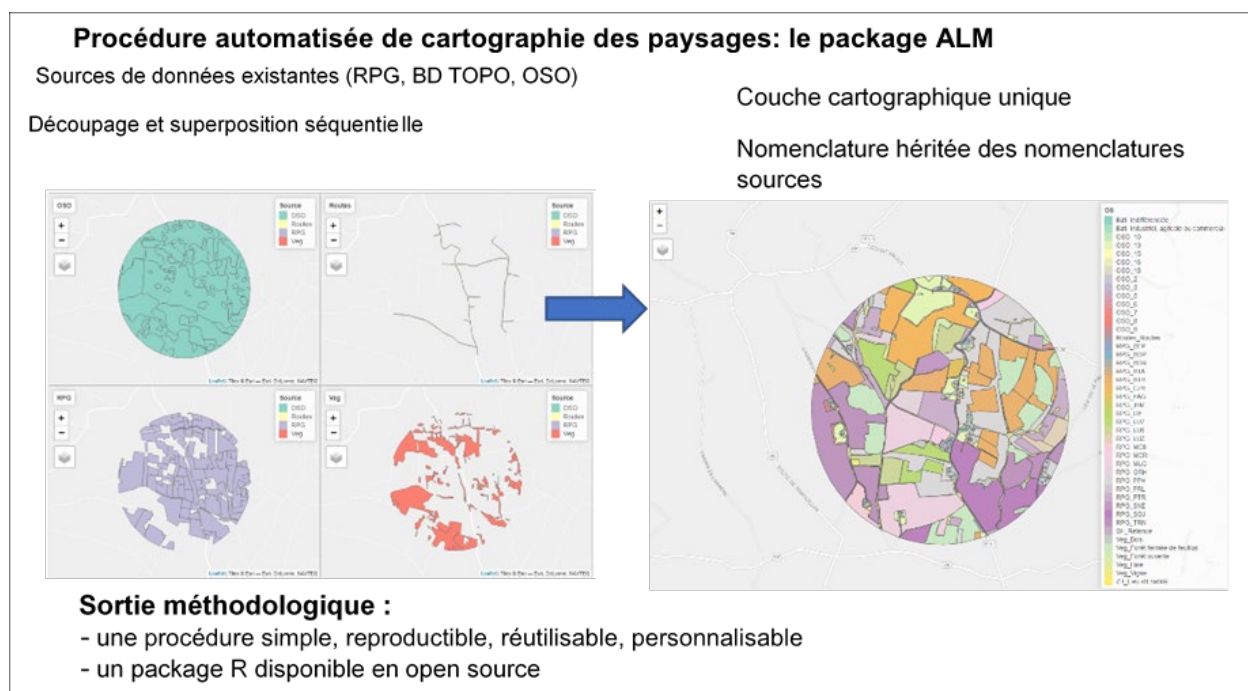


Fig.2. Le principe de la procédure ALM Automatic Landscape Mapping développée dans PREPARE

3.2 Analyse des relations entre le niveau de régulation biologique et des variables météorologiques, paysagères, et agronomiques: modèles GLMM

Les taux de prédation des différentes proies sentinelles ont été mis en relation pour chacun des 5 sites régionaux avec des déterminants de 4 catégories (pratiques, paysage, météo annuelle et météo d'exposition, voir liste exhaustive des variables dans le Tableau 1).

Nous avons exploré différents sous-jeux de données en effectuant des analyses soit tous sites confondus (« modèle global »), soit par site (« modèle local »), soit en regroupant les cultures annuelles d'une part (sites Dijon-Rennes-Toulouse, « DRT ») et les cultures pérennes d'autre part (Avignon-Bordeaux, « AB »). Nous avons utilisé une approche de « model averaging » (« modèle moyen ») basée sur des Modèles Linéaires Généralisés Mixtes (GLMM) qui permettent de prendre en compte les données observées de type « proportion » et de spécifier que les mesures sont répétées dans le temps sur une même parcelle.

Tableau 1. Liste des covariables potentiellement explicatives des niveaux de régulation biologique

Code variable	Description/nom	Catégorie
Ps	Précipitations totales (pendant exposition)	Météo d'exposition
Vm	Vent moyen (pendant exposition)	Météo d'exposition
Tx	Température maximale (pendant exposition)	Météo d'exposition
An_Tn	Température minimale absolue (annuelle)	Météo Annuelle
An_Tm	Température moyenne (annuelle)	Météo Annuelle
An_Tx	Température maximale absolue (annuelle)	Météo Annuelle
An_Ps	Précipitations totales (annuelle)	Météo Annuelle
An_Gel_Succ	Nombre maxi. de jour de gels successifs (annuelle)	Météo Annuelle
Snh_surf	Taux d'habitats semi-naturels surfaciques	Paysage
Snh_lin	Taux d'habitats semi-naturels linéaires	Paysage
Cult_hote	Taux de culture hôte	Paysage
Shannon_Cult	Diversité de Shannon du paysage (cultures uniquement)	Paysage
Shannon_Comb	Diversité de Shannon du paysage (cultures et hab. semi-nat.)	Paysage
Nb_Cult	Nombre de cultures dans le paysage	Paysage
mparea_Culture	Taille moyenne des patchs de culture	Paysage
int_cult_snh	Longueur des interfaces culture / habitats semi-naturels	Paysage
Bio2018	Taux de culture du paysage (2018)	Paysage
IFT_Paysager	IFT paysager	Paysage
IFT_Paysager_snh	IFT paysager (incluant les habitats semi-naturels)	Paysage
type_culture_reduit	Type de culture dans la parcelle hôte	Pratiques
IFT_Xtot	IFT chimique total dans la parcelle hôte	Pratiques

La Figure 3 indique, pour chaque type de proies sentinelles et chaque sous-jeu de données utilisé, le poids des différents types de covariables (proportion de variance expliquée par chacun d'eux). On constate une grande variabilité dans la qualité explicative des modèles (valeur de R^2) selon le type de proie et le jeu de données considéré. Globalement, bien qu'ils utilisent moins de données, les modèles basés sur les jeux de données par site sont plus explicatifs que ceux basés sur les jeux de données regroupant plusieurs sites. Ceci indique la présence de spécificités par site dans la réponse des régulations biologiques aux variables considérées, avec une importance du paysage très variable, généralement élevée à Rennes et Toulouse. Dans l'ensemble également, les modèles expliquant la régulation biologique des pucerons sont peu explicatifs (toujours moins de 20% de variance expliquée). Pour la suite, nous nous sommes donc concentrés sur les analyses par site des taux de prédateurs des graines et des *Ephestia*. Pour ces modèles, on note un effet toujours fort des variables météorologiques durant l'exposition des cartes de proies sentinelles (« expo. ») et les conditions climatiques annuelles des sites (« ann. »). Parmi les variables d'intérêt, il ressort un effet positif du taux de culture hôte sur la prédation des *Ephestia* à Rennes, un effet négatif de la diversité du paysage sur la prédation des *Ephestia* à Dijon et un effet négatif de l'Indice de Fréquence de Traitements chimiques sur la prédation des graines à Avignon.

Si l'utilisation de ces modèles pour l'identification des variables influentes reste valide, l'ordre de grandeur des R^2 ne permet pas d'envisager leur utilisation pour prédire et simuler l'effet de changement de pratiques ou de paysage sur les niveaux de régulation biologique. Nous avons donc mobilisé une méthode alternative reposant sur l'utilisation de modèles « Cubist ».

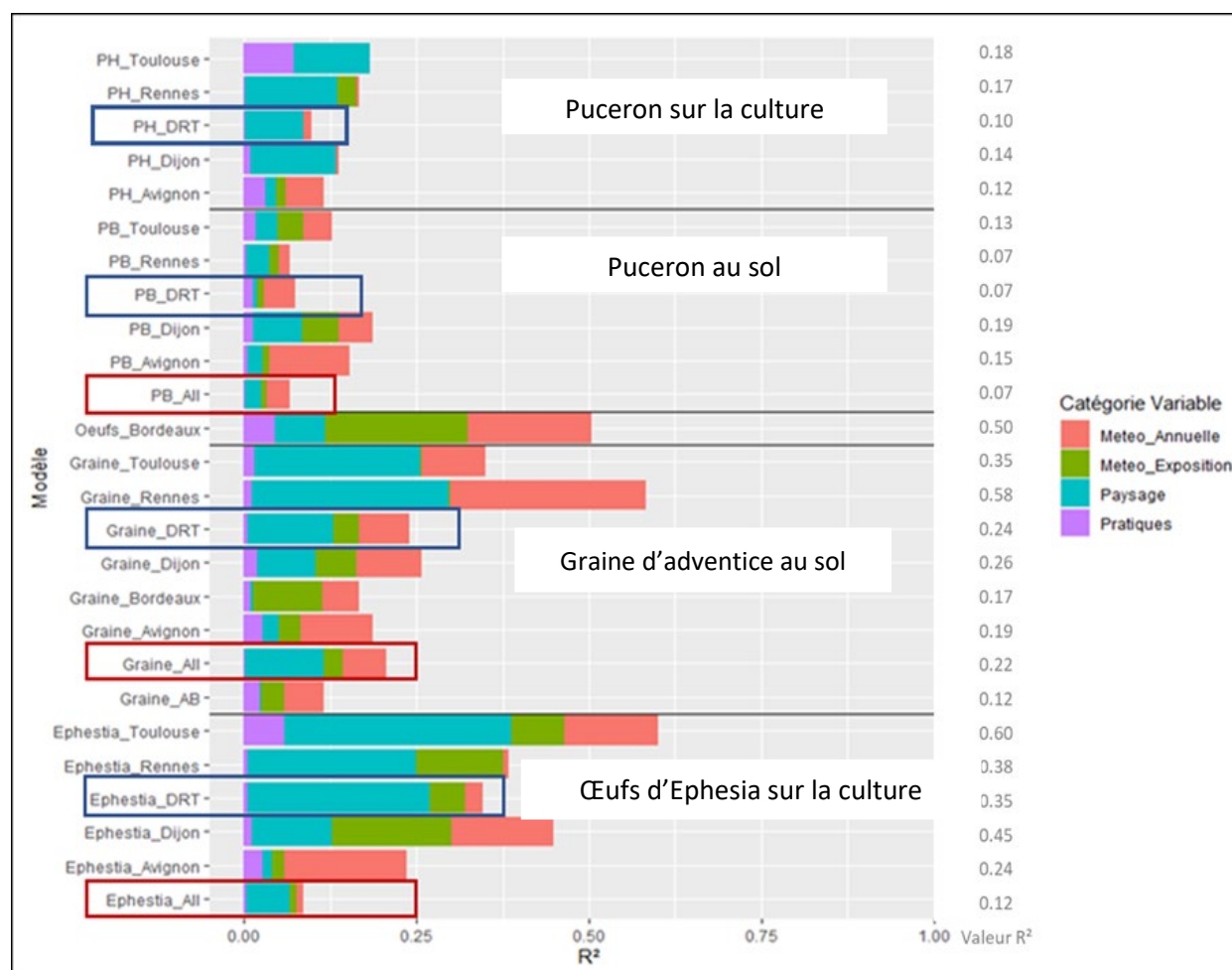


Fig 3. Valeur explicative (R^2) et poids des 4 grands types de covariables pour chaque type de proies pour les modèles explicatifs par site régional, par type de culture cible (DRT = Dijon + Rennes+ Toulouse encadrés en bleu; AB = Avignon + Bordeaux) ou pour tous les sites régionaux confondus (ALL, encadrés en rouge).

1.3. Modélisation prédictive du niveau de régulation biologique

Du fait de la diversité et du nombre important des situations observées par le réseau SEBIOPAG, dans l'espace et dans le temps, **une approche par apprentissage statistique** est rendue possible. Notre choix algorithmique a été guidé par le souci de compromis entre interprétabilité et capacité de prédiction, orientant vers des méthodes basées sur les arbres de régression. Le très usité algorithme de random forest n'a pas été retenu en raison de ses limitations en extrapolation sur la variable-réponse (niveau de régulation). En effet, les gammes de variation de la variable-réponse observées dans le jeu de données sont limitées, et par construction de l'algorithme de random forest les valeurs prédites sont contraintes par les bornes des gammes de variation observées. Pour pallier cette limitation, nous avons sélectionné l'approche Cubist. Il s'agit d'un arbre dont les feuilles terminales contiennent des modèles de régression linéaire basés sur les prédicteurs utilisés dans les divisions précédentes; il existe également des modèles linéaires intermédiaires à chaque étape de l'arbre. De façon très résumée, un modèle Cubist peut être appréhendé comme un modèle linéaire par morceaux basé sur un arbre de décision. Le modèle Cubist peut également utiliser un

schéma semblable à celui du boosting, appelé comités, dans lequel des arbres de régression sont créés en séquence. La prédiction finale est une simple moyenne des prédictions de chaque arbre. L'implémentation des modèles a été effectuée en utilisant le package Cubist v0.4.2.1 disponible dans l'environnement de programmation R (R Core Team, 2021).

Dans notre contexte, l'ajustement d'un modèle Cubist correspond à la production d'un ensemble de règles du type 'If conditions then linear formula' pour un site et pour une proie donnés. La qualité de l'ajustement du modèle est évaluée sur la base d'apprentissage et peut être caractérisée par des métriques telles que la racine carrée de l'erreur quadratique moyenne (RMSE), le niveau de corrélation entre valeurs observées et prédites (R^2), et l'erreur relative (RE) qui matérialise le gain entre la variance expliquée par le modèle prédictif et celle expliquée par un modèle nul, i.e. qui délivre en sortie la valeur moyenne de la variable-réponse. Par ailleurs, une mesure de l'importance relative de chaque variable est produite en sortie. Afin de ne pas surestimer la capacité prédictive de chaque modèle, une procédure de validation croisée spatialisée a été implémentée. Elle consiste à ajuster chaque modèle sur les observations du niveau de régulation dans 90% des parcelles et ce pour chaque valeur du nombre de comités C, puis à évaluer ce modèle sur les observations des 10% de buffers restant. L'hyperparamètre optimal est retenu, et le modèle final est celui appliqué au jeu complet de données (i.e. 100% des parcelles). A titre d'exemple, la figure 4 illustre, pour la situation Dijon-*Ephestia*, la qualité d'ajustement du modèle Cubist (A) et l'importance relative de chaque variable impliquée (B).

Synthèse des performances des différents modèles testés

Site	Proie	N	C	RMSEp	R ² p	RMSE	R ²	RMSE null	corr	RE
DIJON	Ephestia	208	8	0.17	0.59	0.15	0.7	0.27	0.66	0.73
	Graines	230	9	0.31	0.18	0.26	0.34	0.32	0.49	0.89
	PuceronBas	230	5	0.25	0.23	0.22	0.43	0.29	0.38	0.97
	PuceronHaut	228	6	0.23	0.28	0.18	0.56	0.27	0.55	0.83
RENNES	Ephestia	154	1	0.14	0.15	0.13	0.23	0.15	0.19	1.26
	Graines	154	7	0.22	0.54	0.20	0.64	0.33	0.71	0.64
	PuceronBas	155	10	0.21	0.26	0.18	0.58	0.25	0.44	0.92
	PuceronHaut	155	1	0.21	0.22	0.18	0.42	0.24	0.40	0.96
TOULOUSE	Ephestia	203	3	0.19	0.52	0.15	0.70	0.27	0.70	0.69
	Graines	206	10	0.29	0.20	0.21	0.53	0.30	0.57	0.84
	PuceronBas	201	3	0.22	0.25	0.17	0.45	0.21	0.51	0.87
	PuceronHaut	198	2	0.22	0	0.22	0.09	0.23	0.16	1.28
AVIGNON	Ephestia	201	7	0.19	0.17	0.17	0.32	0.21	0.44	1.03
	Graines	183	9	0.23	0.38	0.18	0.61	0.29	0.60	0.75
	PuceronBas	202	1	0.17	0.17	0.15	0.37	0.18	0.28	1.03
	PuceronHaut	205	7	0.23	0.09	0.18	0.40	0.23	0.31	1.08

Tableau 2 : Synthèse des performances des modèles Cubist associés aux différentes situations site-proie. N : nombre d'observations. C : hyperparamètre du nombre de comités. RMSE, RMSEp, RMSEnull : racines carrées de l'erreur quadratique moyenne sur les jeux d'apprentissages et de validation, et pour le modèle nul. R^2 , R^2p : coefficients de détermination en apprentissage et en validation. Corr : coefficient de corrélation. RE : erreur relative. Les lignes en gras signalent les modèles dont la validation est satisfaisante.

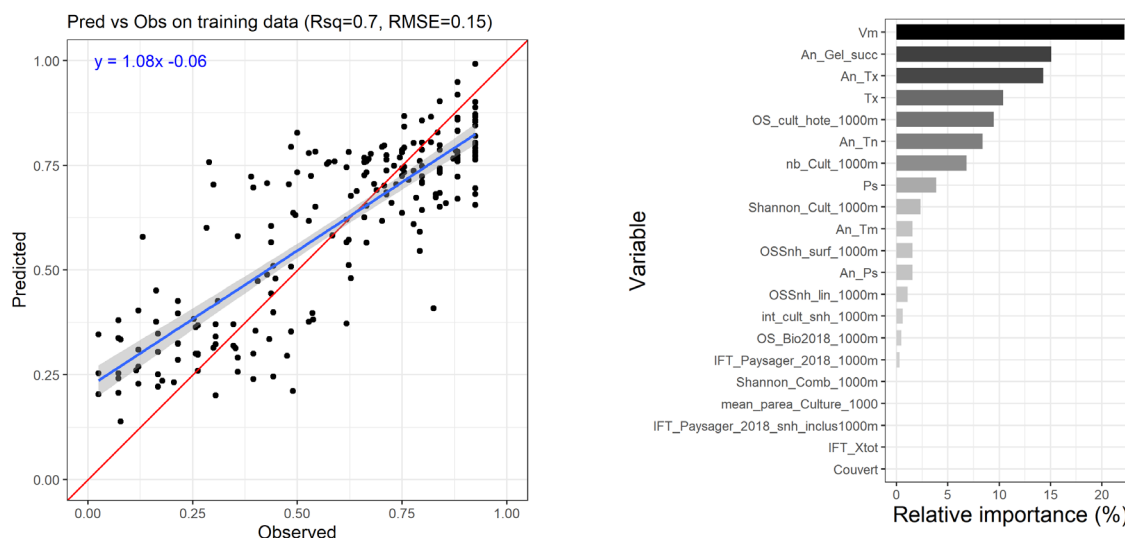


Fig 4 : Illustration de sorties de modélisation dans la situation Dijon-*Ephestia*. (A) Scatterplot des valeurs de niveau de régulation prédites vs observées. (B) Barplot des importances relatives des variables (cf Tableau 1 pour l'explication des noms des variables).

2. Explorer les effets de scénarios territoriaux sur la régulation

2.1 L'outil de simulation PREPARE

Pour simuler l'effet de différents systèmes de production agricoles d'un territoire et la mise en place de leviers territoriaux sur la régulation biologique et analyser les effets de synergies entre les exploitants, nous avons développé un simulateur basé sur la plateforme de développement JAVA APILand et qui comprend essentiellement 2 modules couplés ; un module d'allocation de couverts sous contraintes agronomiques CAPFarm² et un module de caractérisation des paysages pour la biodiversité qui se nomme Chloe³. Ce modèle est basé sur celui décrit dans Martel et al. (2019)⁴ et Bareille et al.(2020)⁵

Le générateur d'assolement des exploitations d'un territoire : Description de l'outil. CAPFarm est un générateur d'assolement qui prend en compte différents types de contraintes agronomiques pour réaliser des simulations d'allocations de cultures cohérentes du point de vue des contraintes implémentées. CAPFarm peut être paramétré en utilisant des contraintes spatiales (surfaces minimales de couverts par exemple) ou temporelles (délais de retour des cultures notamment). Dans le cadre du modèle PREPARE, seules des contraintes spatiales ont été mobilisées car la dimension temporelle n'a pas été explorée. Ainsi les rotations culturales ont été traduites en proportions de contraintes de répartition spatiales ; par exemple, si un système de culture d'une exploitation se base sur la rotation Maïs - Blé - Blé, cela se traduit dans l'outil par une contrainte sur la surface en maïs pour observer chaque année environ 33% de la SAU et une contrainte sur le blé pour observer environ 66%

² Boussard et al. 2018. CAPFARM: simulation d'allocations de couverts à l'échelle des exploitations agricoles et des paysages Agronomie Environnement et Sociétés, 8

³ <https://bagap.rennes.hub.inrae.fr/productions/logiciels>

⁴ Martel et al. 2019. European Journal of Agronomy. <https://dx.doi.org/10.1016/j.eja.2017.07.014>

⁵ Bareille, F., Boussard, H., Thenail, C. Ecological Economics, <https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2019.106482>.

de la SAU, moyennant bien entendu la surface réelle des parcelles. Avec CAPFarm, c'est chaque exploitation qui doit être paramétrée selon son propre système de production. Pour des raisons de simplification à l'initialisation des territoires qui peuvent parfois contenir une vingtaine d'exploitations, celles-ci ont été regroupées en 2 ou 3 types de systèmes de production selon les territoires. Chaque exploitation se voit donc affectée dans l'un de ces 2 ou 3 types, parfois sur la base de critères topographiques comme cela a été le cas sur le site "toulousain" où les exploitations sur les versants, les coteaux ou la plaine n'ont pas le même type de logique agronomique. Une fois la phase de spatialisation des types de systèmes de production réalisée, 10 allocations des cultures respectant les contraintes agronomiques ont été réalisées aléatoirement pour chaque exploitation (figure 5). Sur un territoire contenant 20 exploitations, cela représente un nombre de paysages assolés possibles de l'ordre de 10^{20} . C'est parmi ce très grand nombre de combinaisons d'assolements possibles que sont choisis les paysages retenus pour l'évaluation environnementale de la régulation biologique en fonction des différents scénarios testés.

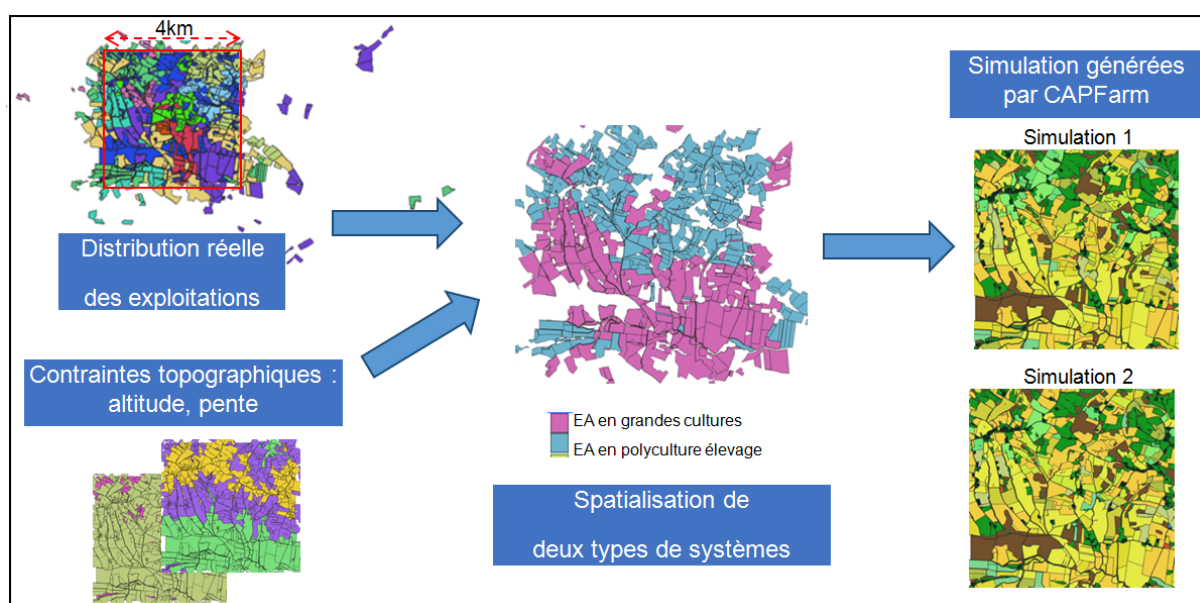


Fig. 5 : Principe de simulation d'assolement avec CAPFarm

Le calcul des métriques pour l'expression de la régulation biologique via l'intégration des modèles prédictifs dans l'outil

Chloe est un outil d'analyse spatiale calculant des métriques paysagères dans des fenêtres glissantes. Les modèles prédictifs (Cubist) retenus dans l'axe 1 du projet PREPARE sont basés sur des variables locales, comme le type de culture sur la parcelle ou l'IFT local par exemple, mais également sur des métriques paysagères comme la diversité de Shannon (SHDI), calculées dans des fenêtres (ou buffers) de 1 km de rayon. Intégrer le module Chloe au sein du simulateur permet donc de calculer ces métriques "à la volée" sur les nombreux paysages qui seront générés par CAPFarm et ainsi de pouvoir évaluer les modèles prédictifs afin de noter ces paysages du point de vue de la régulation biologique (figure 6). Une fois ce calcul réalisé en tous points de l'espace de la zone d'étude (tous les 50 m), les valeurs de régulation biologique pour chaque exploitation sont calculées comme étant la somme des valeurs de régulation biologique des pixels de la carte contenus dans leur parcellaire respectif.

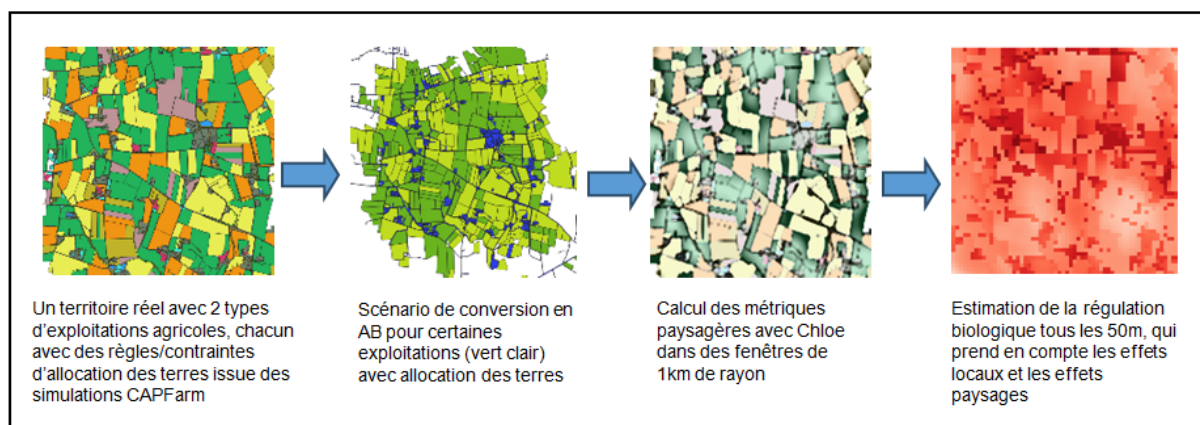


Fig.6 : principe de calcul de la régulation biologique en tous point de l'espace de la zone d'étude à l'aide de la chaîne de modélisation CAPFarm, Chloe, modèles prédictifs Cubist (R)

4.2 Démarche d'évaluation ex-ante mise en œuvre sur les territoires

Territoires de simulations réalistes

Dans le cadre de notre démarche de modélisation et afin de faire adhérer au mieux les partenaires non-académiques aux résultats du projets, nous avons souhaité avoir des modèles circonstanciés qui soient les plus réalistes possible du point de vue des 5 territoires de simulation visés. Ainsi, chaque site est paramétré selon ses propres caractéristiques géographiques, réalité topographique, taille des territoires d'exploitations, taille des parcelles, type de systèmes agronomiques présents et bien entendu, réponse de régulation biologique aux facteurs météorologiques et agronomiques locaux. Au final, ce sont des zones carrées de 4 km * 4 km qui ont été simulées contenant environ entre 15 et 20 exploitations (figure 5).

Plan de simulation

Pour rappel, les leviers territoriaux identifiés par le collectif du projet PREPARE et validés par les agriculteurs lors du premier atelier pour améliorer la régulation biologique étaient l'allongement des rotations culturales, la réduction des IFT, le passage en AB et l'implantation d'infrastructures agro-écologiques (IAE) de type "haies". Or, à aucun moment les métriques de proportion de surface d'IAE ne sont ressorties comme significatives dans nos modèles statistiques explicatifs de la régulation biologique. Nous avons donc laissé ce levier de côté concernant les simulations. Nous n'avons par ailleurs pas effectué de simulation en cultures pérennes du fait de la faible qualité des modèles prédictifs, sauf pour la prédation des graines en verger, mais celle-ci ne correspond pas à une préoccupation des arboriculteurs.

En ce qui concerne les cultures annuelles, nous avons intégré les trois autres leviers sous forme d'un gradient de désintensification des pratiques agricoles. Ainsi, pour chaque système de production type identifié sur un territoire, nous l'avons décliné sous 3 formes, i) une forme "intensive" qui se caractérise par des rotations courtes, avec peu de cultures différentes et des IFT non nuls, ii) une forme "raisonnée" qui se caractérise par des rotations plus longues, avec davantage de cultures et des IFT réduits de 25% et iii) une forme "biologique" qui se caractérise par des rotations encore plus longues, avec davantage de cultures et des IFT nuls. Mais nous n'avons pas appliqué toutes ces formes de systèmes de production à chaque exploitation. Nous avons fait le choix, toujours dans un souci de réalisme, de proposer pour chaque

exploitation un état "initial" et un état "trajectoire". Ainsi, à l'état "initial", toutes les exploitations ne sont pas forcément dans un système de production "intensif", certaines sont sous une forme "raisonnée", d'autres en "biologique", le tout appliqué dans des proportions réalistes par rapport aux spécificités des sites régionaux. De la même manière, à l'état "trajectoire", nous avons fait le choix de fixer certaines exploitations dans leur situation initiale ("initial" = "trajectoire"). Pour chacune des situations de chaque exploitation, nous avons fait tourner CAPFarm.

Scénarios de changement issus de l'atelier 1

Le premier scénario de simulation considère chaque exploitation avant changement cad à son état "initial" (scénario 1) tandis que le deuxième scénario considère chaque exploitation après changement cad état "trajectoire" (scénario 2). Deux autres simulations sont ensuite réalisées pour chaque exploitation agricole ; la première n'applique la trajectoire que pour cette exploitation agricole (que se passe-t-il s'il n'y a que moi qui change ?), la seconde applique toutes les trajectoires de systèmes de production sauf pour l'exploitation agricole considérée (que se passe-t-il si tout le monde change sauf moi ?). Nous avons ensuite considéré un troisième scénario 'collaboratif' tentant de simuler si un optimum (local) pourrait être atteint en faisant communiquer les exploitants sur leurs intentions/possibilités d'allocations de cultures constitue le scénario 3. Techniquement, cela peut s'obtenir en implémentant un algorithme de Nash qui consiste à ce que chaque exploitation teste ses différentes possibilités d'allocations au regard de la valeur de régulation biologique globale (= sur l'ensemble du site), choisisse la meilleure et en informe le prochain agriculteur à tester ses possibilités d'allocations. Le processus tourne ainsi tant que la situation globale est améliorée. On obtient alors une situation d'optimum local dans laquelle plus personne n'a intérêt à modifier son allocation au risque de réduire la valeur de régulation biologique globale.

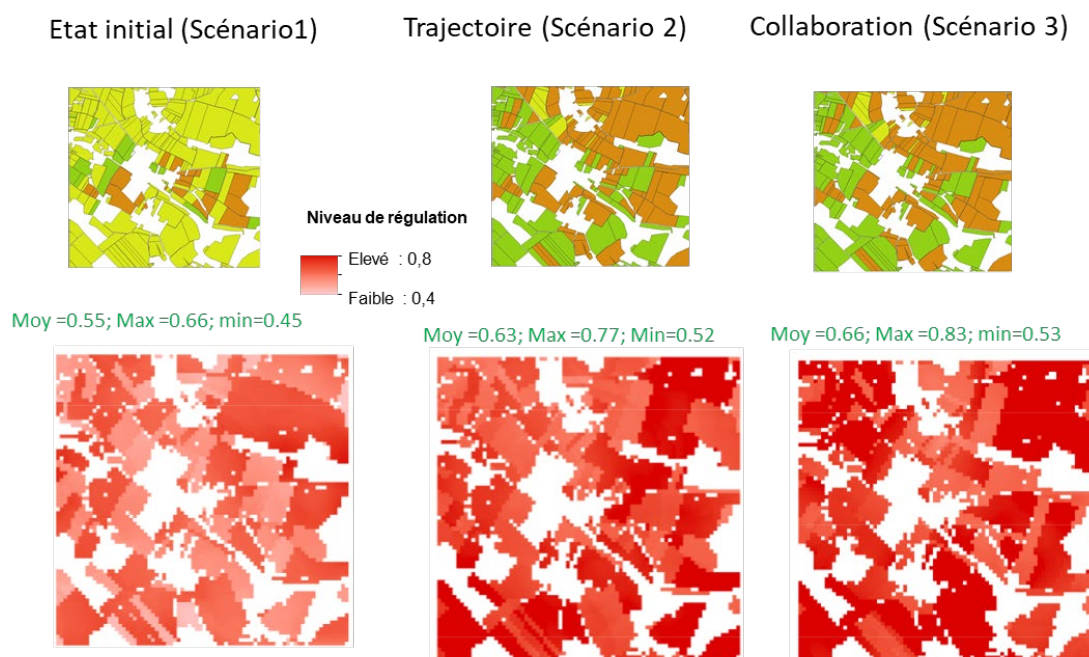


Fig 7 Exemple de sortie de l'outil de simulation pour les trois scénarios décrits (territoire sur site régional de Dijon). Ligne du haut = cartographie du parcellaire (3 types de conduite de culture) ; Ligne du bas = évaluation du niveau de RB pour chaque pixel du territoire.

Annexes: textes des publications

Rapport complet du projet

Sandrine Petit, Audrey Alignier, Stéphanie Aviron, Hugues Boussard Pierre Franck, Caroline Gibert, Claire Lavigne, Sylvain Poggi, Benoit Ricci, Adrien Rusch, Aude Vialatte Juliette Young (2023). PREPARE : COMPRENDRE ET PREDIRE LES EFFETS DES PAYSAGES DE PRATIQUES SUR LA REGULATION BIOLOGIQUE. Rapport complet avec résultats globaux et résultats détaillés pour chaque terrain d'étude. 84 pages

☐ Publications scientifiques parues

- Petit, S., Alignier, A. Allart, R., Aviron, S., Boussard, H., Franck, P., Gibert, C., Ladet, S., Lavigne, C., Lecuyer, L., Moncamp, M., Muneret, L., Poggi, S., Ricci, B., Rusch, A., Vialatte, A., Young, J. (2023) *Building capacities for the design of agroecological landscapes: the added-value of Landscape Monitoring Networks*. Agriculture, Ecosystems & Environment. 342, pp.108263. 10.1016/j.agee.2022.108263 (<https://hal.inrae.fr/hal-03853832>) **OPEN ACCESS**
- Jeanneret Ph, Aviron S., Alignier A., Lavigne C., Helfenstein J., Herzog F., Kay S., Petit S. (2021) *Agroecology landscapes*. Landscape Ecology, Springer Verlag, 2021, 36 (8), pp.2235-2257. 10.1007/s10980-021-01248-0. (<https://hal.inrae.fr/hal-03534493>) **OPEN ACCESS**
- Allart, R., Ricci, B., Poggi, S. 2021. Procédure alm de cartographie automatique du paysage. Cahiers des Techniques de l'INRA, INRA, 2021, 103, pp.12 https://www6.inrae.fr/cahier_des_techniques/Les-Cahiers-parus/Les-N-reguliers/2021/Cahier-N-103/Art1-ct103-2021. (<https://hal.inrae.fr/hal-03151041>)