



HAL
open science

Évaluation et comparaison d'indices du service de pollinisation à l'échelle de paysages agricoles

T Gandara

► **To cite this version:**

T Gandara. Évaluation et comparaison d'indices du service de pollinisation à l'échelle de paysages agricoles. Biodiversité et Ecologie. 2022. hal-04191861

HAL Id: hal-04191861

<https://hal.inrae.fr/hal-04191861>

Submitted on 30 Aug 2023

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

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



Évaluation et comparaison d'indices du service de pollinisation à l'échelle de paysages agricoles

Dominante Gestion des Milieux Naturels 2021-2022

Gandara Thibault – Soutenance le 11/10/2022

Structure d'accueil : Centre d'écologie et des Sciences de la conservation

Encadrement : Emmanuelle Porcher (CESCO), Alice Michelot-Antalik (LAE), Antoine Gardarin (Unité Mixte de Recherche Agronomie)

Enseignant Référent : Christian Piedallu (UMR Silva)



Engagement de non-plagiat

❶ Principes

- Le plagiat se définit comme l'action d'un individu qui présente comme sien ce qu'il a pris à autrui.
- Le plagiat de tout ou parties de documents existants constitue une violation des droits d'auteur ainsi qu'une fraude caractérisée.
- Le plagiat concerne entre autres : des phrases, une partie d'un document, des données, des tableaux, des graphiques, des images et illustrations.
- Le plagiat se situe plus particulièrement à deux niveaux : ne pas citer la provenance du texte que l'on utilise, ce qui revient à le faire passer pour sien de manière passive ; recopier quasi intégralement un texte ou une partie de texte, sans véritable contribution personnelle, même si la source est citée.

❷ Consignes

- Il est rappelé que la rédaction fait partie du travail de création d'un rapport ou d'un mémoire, en conséquence lorsque l'auteur s'appuie sur un document existant, il ne doit pas recopier les parties l'intéressant mais il doit les synthétiser, les rédiger à sa façon dans son propre texte.
- Vous devez systématiquement et correctement citer les sources des textes, parties de textes, images et autres informations reprises sur d'autres documents, trouvés sur quelque support que ce soit, papier ou numérique en particulier sur internet.
- Vous êtes autorisés à reprendre d'un autre document de très courts passages *in extenso*, mais à la stricte condition de les faire figurer entièrement entre guillemets et bien sûr d'en citer la source.

❸ Sanctions

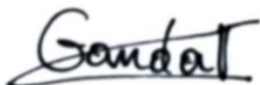
- En cas de manquement à ces consignes, la direction des études et de la pédagogie ou le correcteur se réservent le droit d'exiger la réécriture du document sans préjuger d'éventuelles sanctions disciplinaires.

❹ Engagement

Je soussigné (e) Thibault Gandara reconnais avoir lu et m'engage à respecter l'engagement de non-plagiat.

À Nancy le 02/09/2022

Signature :



Abstract :

Français :

Le déclin actuel des pollinisateurs est un enjeu majeur, notamment parce qu'un tiers de la production agricole mondiale dépend de la pollinisation. Cependant, il reste difficile de quantifier si la perte de certains pollinisateurs se traduit par une pollinisation moins efficace, notamment à l'échelle des territoires agricoles, qui est une échelle pertinente pour agir. L'objectif de notre étude était d'évaluer la pertinence de deux indicateurs de pollinisation développés à l'échelle nationale (ou supranationale), pour caractériser la pollinisation sur un territoire agricole de 950 ha de grandes cultures (plateforme de Fénay près de Dijon, France). Nous avons spécifiquement évalué l'indicateur de service de pollinisation réalisé, basé sur les rendements des cultures et leur dépendance aux pollinisateurs, et l'indicateur de pollinisation potentielle simulé par le modèle InVEST, basé sur l'utilisation et la couverture du sol comme indicatrices des ressources florales et de nidification potentielle. Nous avons examiné la variation spatio-temporelle de ces indicateurs sur la zone de Fénay entre 2006 et 2019 et leurs corrélations environnementales (pratiques agricoles, paysage et météo).

Nos résultats suggèrent que les deux indicateurs conçus pour une grande étendue spatiale peuvent s'avérer utiles au sein des territoires agricoles : les deux indicateurs présentent des variations significatives sur la zone d'étude, dont certaines pourraient être liées à des variables environnementales connues pour influencer les pollinisateurs. Par exemple, la variation spatiale de l'indice de service de pollinisation réalisée est corrélée aux pratiques agricoles, avec une pollinisation moins efficace dans les parcelles où l'on utilise davantage d'herbicides. Aucune corrélation avec les éléments semi-naturels les plus proches n'a été trouvée, ce qui contredit les résultats d'études précédentes à l'échelle du champ. La variation temporelle de l'indice de service de pollinisation ne semble pas présenter de relation particulière avec les données météorologiques. L'indicateur de pollinisation potentielle présente une corrélation significative avec l'indicateur de pollinisation réalisée à l'échelle du paysage.

Anglais :

The current pollinator decline is a major issue, notably because one-third of the world agricultural production depends on pollination. However, quantifying whether the loss of some pollinators translates into less efficient pollination remains challenging, particularly at the scale of farmland territories, which is a relevant scale for action. The objective of our study was to evaluate the relevance of two pollination indicators developed at the national (or supranational) scale, to characterize pollination on a 950 ha agricultural territory of field crops (Fénay platform near Dijon, France). Specifically, we evaluated the realized pollination service indicator, based on crop yields and their dependence on pollinators, and the potential pollination indicator simulated by the InVEST model, based on land use and cover as indicators of floral and potential nesting resources. We examined the spatio-temporal variation of these indicators in the Fenay area between 2006 and 2019 and their environmental correlations (agricultural practices, landscape and weather).

Our results suggest that the two indicators designed for a large spatial extent can be useful within agricultural territories: both indicators show significant variation over the study area, some of which could be related to environmental variables known to influence pollinators. For example, spatial variation in the realized pollination service index correlates with agricultural practices, with less efficient pollination in plots with higher herbicide use. No correlation with the nearest semi-natural features was found, contradicting the results of previous field-scale studies. Temporal variation in the pollination service index did not appear to show any particular relationship with weather data. The potential pollination indicator showed a significant correlation with the realized pollination indicator at the landscape scale.

Remerciements

En premier lieu, je souhaite remercier Emmanuelle, Alice et Antoine pour leur encadrement de qualité, profondément humain et l'attention qu'ils ont portés à mon stage malgré un emploi du temps de chercheur.euse.s très occupé.es. Cet encadrement a été complété avec bienveillance par James Daesegher pour de précieux conseils sur l'utilisation de l'outil de modélisation InVEST et par Sandrine Petit-Michaut pour des échanges très constructifs sur la zone paysagère de Fénay.

Merci aussi à tout le laboratoire du CESCO qui m'a accueilli avec gentillesse, avec qui j'ai pu réaliser un stage dans une ambiance sereine, bon enfant et aussi sportive. Je remercie également particulièrement les stagiaires du CESCO avec qui j'ai pu partager un bureau et toutes celles et ceux avec qui j'ai pu partager des moments de vie incroyables ! Ils ont été une source continue de rire et de soutien tout au long de ce travail de recherche et de rédaction.

Dans un cadre plus personnel je souhaite remercier mes parents pour m'avoir toujours soutenu quel que soit la voie que je choisissais. Mes grands-parents avec qui j'ai dernièrement passé beaucoup de temps et qui me font relativiser sur mes conditions de vie actuelles malgré tous les défis auxquels nous sommes confrontés. Et également mes deux colocataires Lucie et Xavier pour leur bonne humeur, leur écoute et les discussions pour refaire le monde que nous avons pu partager.

Table des matières

Liste des figures et tableaux, liste des abréviations	6
I. Introduction	7
Anthropocène et érosion de la biodiversité	7
1. Erosion des populations d'insectes.....	7
2. Le déclin des pollinisateurs.....	8
3. Le service de pollinisation et ses estimations	9
4. Problématique et objectifs du stage.....	11
II. Matériels et méthodes.....	13
1. Territoire d'étude : secteur de Fénay (zone d'étude de l'INRAE de Dijon, mosaïque de grandes cultures).....	13
2. Calcul de l'indice de pollinisation potentielle.....	16
3. Calcul de l'indice du service de pollinisation réalisée :.....	19
4. Analyses statistiques des indices.....	25
III. Résultats	29
1. Variation des indices à l'échelle territoriale	29
2. Comparaison des deux indices	33
3. Variation spatio-temporelle des deux indices à l'échelle d'un territoire agricole.....	36
IV. Discussion.....	42
1. L'indicateur de pollinisation réalisée, un indicateur prometteur mais à retravailler pour identifier la résolution spatiale possible et pertinente	42
2. Deux indicateurs cohérents mais montrant tout de même des différences	44
3. Perspectives de ce travail.....	45
4. Conseils de gestion à partir des données récoltées.....	46
Conclusion.....	47
Références	48
Annexes :.....	52

Liste des figures et tableaux, liste des abréviations

Figure 1. Cadre conceptuel du service écosystémique de pollinisation traduite de Bartholomé et al. (2019).....	10
Figure 2 : Cartographie de la plateforme paysagère de Féney	13
Figure 3. Illustration du fonctionnement de la modélisation InVEST pollination.....	17
Figure 4. Différents effets des pollinisateurs sur les rendements de différentes espèces cultivées.	20
Figure 5. Résultats de la standardisation des rendements sur un jeu de données	21
Figure 6. Présentation de la division en sous-unités du territoire d'étude et des régressions pour le calcul de l'indice associé.....	22
Figure 7. Schéma résumant le fonctionnement des fenêtres glissantes.....	23
Figure 8. Illustration simplifiée du fonctionnement des randoms forests.	26
Figure 9 : Carte du service de pollinisation potentiel, basé sur le calcul de probabilité de présence des pollinisateurs InVEST.....	30
Figure 10. Cartographie de l'indice du service de pollinisation réalisée avec un découpage par cluster adopté.....	31
Figure 11 : Calcul de l'indice de pollinisation réalisée à l'aide de la méthode des fenêtres glissantes...32	
Figure 12 : Indice du service de pollinisation réalisée sur les micro-parcelles	33
Figure 13. Comparaison des différents calculs de l'indice de pollinisation.	34
Figure 14. Corrélations entre indice de pollinisation réalisée et indice de pollinisation potentielle	35
Figure 15. Variations interannuelles (2006-2017) de l'indice de pollinisation sur les différentes échelles d'analyses.....	37
Figure 16. Variation de l'indice de pollinisation réalisée projeté sur les différentes micro-parcelles en lien avec la proportion de milieux semi-naturels à proximité (rayon de 400 m). Approche fenêtre glissante pour des fenêtres de 2000*2000m et un pas de 500 m	39
Figure 17. Importance des différentes variables environnementales dans un modèle Random Forest d'explication de l'indice de pollinisation avérée sur 98 micro-parcelles	40
Figure 18 : Evolution de l'indice du service de pollinisation en fonction de l'utilisation d'herbicides ..	40

I. Introduction

Anthropocène et érosion de la biodiversité

« Changement climatique », « Perte de biodiversité », « Destruction d'habitats » sont des expressions quasi absentes de la sphère politique (Chauvin et al. 2022), et pourtant très importantes dans le monde de la recherche. La notion d'anthropocène (Lewis et al. 2015) désigne le moment où l'influence de l'être humain sur la géologie et les écosystèmes est devenue significative dans l'histoire de la Terre. L'anthropocène est souvent associé à l'expression « sixième extinction de masse ». Ces constats amènent les scientifiques à adapter leurs publications afin de susciter une réaction face à l'érosion constante de la biodiversité. C'est le cas de « l'annihilation des espèces animales par les humains », évoquée dans l'article Ceballos et al. (2017) qui pose la question de l'extinction avérée d'espèces. Concernant les insectes, l'expression d' « Armageddon écologique » (Leather, 2017) a été utilisée par les médias du monde entier. Elle permet de rendre compte de la toute-puissance qu'ont les humains sur l'ensemble des écosystèmes existants et de la guerre perpétuelle que livrent nos modes de vie actuels à la biodiversité. Ces constats forcent certains scientifiques au pessimisme quant au devenir de la biodiversité dans un contexte où les considérations politiques et les intérêts économiques incitent à ignorer cette crise majeure (Cowie et al. 2022). Un déclin massif comme celui décrit précédemment touche les plus grands animaux du monde comme les plus petits. A l'image du dernier roman de Bernard Werber, *La prophétie des abeilles*, qui expose une troisième guerre mondiale causée par la disparition des abeilles, nous n'arriverons peut-être pas à de telles conclusions mais nous nous intéresserons également aux insectes.

1. Erosion des populations d'insectes

Parmi les taxons touchés dans cette sixième extinction de masse, le déclin des insectes suscite un fort intérêt chez les scientifiques, les politiques et le grand public (Hallmann et al. 2017, Goulson. 2019, Tinsley-Marshall et al. 2021, Stephens, 2021), bien que sa réalité soit l'objet de controverses. En effet, les jeux de données de la littérature scientifique sont très hétérogènes dans leur localisation et leur temporalité (par exemple Desquilbet et al. 2021). Des réserves existent sur des régions peu étudiées, et des données sur des laps de temps suffisamment longs manquent pour savoir comment le déclin notable d'insectes signalés en Europe occidentale se compare à celui des régions moins anthropisées du monde (Ollerton et al. 2011). De plus, les variations temporelles d'abondance des populations d'insectes sont souvent non monotones. Cela implique que les simples analyses linéaires réalisées pour caractériser les variations d'abondance peuvent estimer des variations positives comme négatives, en fonction de la période couverte (Duchenne et al. 2022).

Malgré ces controverses, la sphère scientifique tend majoritairement à décrire un déclin généralisé des insectes. Certaines études montrent un déclin drastique de plus de 75% de la biomasse d'insectes en une courte période (Hallmann et al. 2017). D'autres montre un déclin prépondérant de certains ordres à l'image de la perte de 30 % de la richesse en abeilles au Royaume-Uni (Biesmaijer et al. 2006). La perte

de diversité et d'abondance des insectes associée est susceptible de provoquer des effets en cascade sur les réseaux alimentaires et mettre en péril les services écosystémiques qu'ils assurent (Kehoe et al. 2021). L'évolution des paysages, le changement climatique, l'utilisation de pesticides, les pollutions ainsi que les espèces invasives sont citées comme facteurs principaux de ce déclin des populations (LeBuhn et al. 2021 ; Potts et al. 2016). Ainsi, les activités humaines sont un déterminant majeur de ce déclin (Raven et al. 2021), notamment par la fragmentation et la perte d'habitats ainsi que la détérioration de la qualité des habitats (Nilsson et al. 2008 ; Potts et al. 2010). L'intensification agricole du siècle dernier qui se poursuit aujourd'hui est principalement pointée du doigt par de nombreuses études (Hallmann, et al. 2017, Raven et al. 2021). Dans ces milieux agricoles, des études tendent à montrer des conséquences déjà visibles sur les chaînes trophiques : les oiseaux insectivores sont particulièrement touchés dans les paysages agricoles intensifs et la disparition des insectes est avancé comme explication (Goulson. 2014).

2. Le déclin des pollinisateurs

Les pollinisateurs sont des insectes qui contribuent à la pollinisation : le processus de transfert du pollen depuis les structures de reproduction mâles vers les structures de reproduction femelles des fleurs des Angiospermes. Les insectes sont les principaux responsables de la pollinisation animale (EFESE, 2017)

Au sein de la grande classe des insectes, les pollinisateurs sont particulièrement touchés par ce déclin (Potts et al. 2010, Sánchez-Bayo et al. 2019). Les pollinisateurs tiennent une place majeure dans le fonctionnement des écosystèmes. Ils jouent à la fois un rôle dans la reproduction des plantes à fleurs mais ont également une place de proies dans de nombreuses chaînes trophiques. Une diminution de leur nombre impacte donc les écosystèmes en plusieurs points et peut notamment entraîner une diminution du service de pollinisation. Ce service est essentiel pour une partie importante des plantes cultivées dans le monde (Leonhardt et al. 2013 ; Sluijs, 2020). Dans les zones tempérées comme la France, les pollinisateurs sont primordiaux pour assurer les services de reproduction de 78 % des plantes à fleurs (Ollerton et al. 2011). La présence des pollinisateurs est particulièrement cruciale pour un grand nombre de plantes cultivées. Soixante-quinze pourcents des principales cultures vivrières du monde présentent une augmentation de la production de fruits ou de graines grâce à la pollinisation animale (Klein et al. 2007). Dans un contexte où les insectes sont largement moins considérés que d'autres groupes comme les mammifères et les oiseaux dans les plans de conservation (Leandro et al. 2019), le service que prodigie les pollinisateurs les propulse sur le devant de la scène avec une valeur estimée à 153 milliards d'euros pour la production agricole à l'échelle mondiale (Gallai et al. 2009). En France notamment, le Plan National français en faveur des insectes pollinisateurs et de la pollinisation 2021-2026 a été adopté récemment dans cette optique de maintien du service de pollinisation. Il mène notamment une réflexion sur le lien entre activités humaines et pollinisation. En effet, les services qu'apportent les pollinisateurs aux sociétés humaines sont directement impactés par la gestion des territoires (Kremen et al. 2007). Ainsi une gestion délétère pour ces insectes entraînerait des conséquences négatives sur les services qu'ils rendent.

A ce jour, les études empiriques traitant des conséquences du déclin des pollinisateur sur la pollinisation sont rares. Le manque de données sur le long terme est un des facteurs limitants principaux (Cheptou,

2021). Il est probable que ces effets varient d'un écosystème à l'autre et que les écosystèmes modifiés par l'être humain soient plus affectés que les écosystèmes plus naturels. Il est reconnu que la diminution des populations de pollinisateurs entraîne une modification des communautés végétales, les plantes dépendantes de la pollinisation entomophile subissant le plus fort impact (Biesmeijer et al. 2006). La démonstration de l'existence de changements dans les assemblages de pollinisateurs et de changements associés dans les communautés végétales sauvages localement ne prouve pas l'existence d'une crise mondiale de la pollinisation. L'étude de Biesmaijer et al. 2006 menées sur les données de Grande-Bretagne et des Pays-Bas se voit corroborée par les travaux de Gabrielle Martin en France (Martin et al. 2019). La contribution de la diversité fonctionnelle des réseaux de pollinisation au maintien de la diversité des communautés végétales est établie (Fontaine et al. 2005). Toutefois quantifier exactement l'impact de cette perte de pollinisateurs sur le service de pollinisation est complexe. Des études montrent par exemple que l'exclusion d'une partie des pollinisateurs n'entraîne pas forcément une chute drastique de la pollinisation car des mécanismes de compensation peuvent se mettre en place (Hallett et al. 2017). Des cortèges de pollinisateurs présents remplacent les espèces de pollinisateurs qui ne sont plus présents, mais des limites existent dans les cas de fortes spécificités dans les interactions plantes-pollinisateurs.

3. Le service de pollinisation et ses estimations

Le service de pollinisation peut être défini de multiples manières et fait aujourd'hui l'objet de diverses approches. Evaluer ce service permet de faire le lien entre la diversité en pollinisateurs présente à un endroit donné et le bénéfice que peut en tirer la société humaine grâce à l'action de ces pollinisateurs. Bartholomée et al. (2019) fait état de l'ensemble des mesures de pollinisation qui existent en tant que en tant que fonction ou service. Cet article établit de manière claire quatre définitions de la pollinisation (Figure 1. Cadres orange). Deux définitions correspondent au service de pollinisation d'approvisionnement et se concentrent sur les insectes pollinisateurs (

Figure 1). La première définition est la présence de pollinisateurs, elle peut être estimée directement par des mesures d'abondance et de richesse en pollinisateurs, ce qui permet d'obtenir une mesure de la biodiversité des insectes fournissant le service de pollinisation ou indirectement par l'estimation des ressources florales et des sites de nidification. La seconde définition découle de la présence de pollinisateurs et s'attarde à caractériser le transfert de pollen permis par les insectes. Pour cela, les fréquences de visite et/ou l'efficacité du transfert de pollen (c'est-à-dire le nombre de grains de pollen laissés lors d'une seule visite) peuvent être mesurés. Les deux autres définitions sont proches et correspondent au flux réalisé du service de pollinisation et se concentrent donc sur l'efficacité de la fonction de pollinisation, à savoir la production des plantes. La troisième définition adoptée est le succès de la pollinisation, soit le succès reproductif de la plante attribuable à l'action des insectes pollinisateurs, estimé par le nombre de tubes polliniques se développant ou par la production de graines ou de fruits à l'échelle de la plante individuelle. La dernière définition se concentre sur la récolte destinée à la consommation humaine est le succès reproductif attribuable à l'action des insectes pollinisateurs à

l'échelle du champ ou de l'exploitation. Elle se mesure en rendement par unité de surface ou décrit la qualité de la récolte pour la consommation.

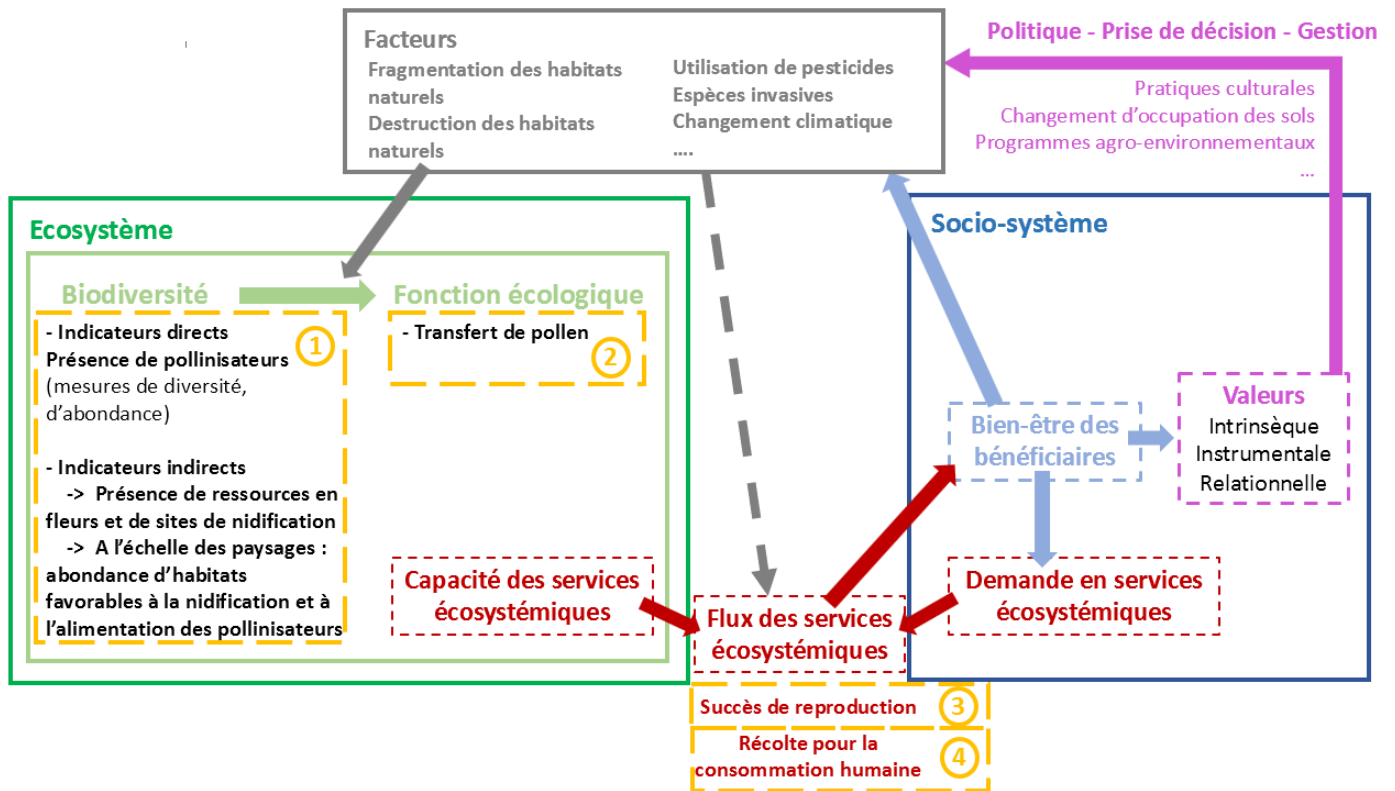


Figure 1. Cadre conceptuel du service écosystémique de pollinisation traduite de Bartholomé et al. (2019). Les cases et les flèches vertes représentent les composantes de l'écosystème ; les cases et les flèches bleues représentent les composantes du socio-système ; les termes et les flèches rouges représentent les Services Écosystémiques (SE) ; les éléments violets représentent les valeurs des SE (sur la base du cadre IPBES (Pascual et al. 2017)) et les décisions/actions qui en résultent sur les écosystèmes ; la boîte grise et les flèches représentent les facteurs de changement de l'état de l'écosystème et du flux des SE. Les encadrés en pointillés orange représentent les différentes définitions du service de pollinisation, numérotés de 1 à 4.

La pollinisation peut donc être étudiée très finement en prenant en compte la deuxième ou troisième définition de cette synthèse. En effet, il est possible d'étudier le transfert de pollen de fleurs en fleurs précisément ou bien d'estimer le succès de reproduction et la production des plantes qui en découle précisément. Ces mesures peuvent être réalisées à l'aide de plantes phytomètres (Woodcock et al. 2014 ; MacInnis et al. 2019 ; McDougall et al. 2022). Ces suivis permettent de mettre en lien abondance et diversité de pollinisateurs avec le succès reproductif des plantes observées. Il est alors possible d'établir des assemblages de pollinisateurs idéaux pour la reproduction de certaines plantes (Woodcock et al. 2014) et l'étude de l'exclusion des pollinisateurs avec un ensachage des fleurs de certains pieds permet de déterminer la dépendance de certaines espèces aux pollinisateurs (Klein et al. 2007). Cependant, la mise en place de protocoles aussi précis est inimaginable à une échelle spatiale telle que des territoires agricoles, considérant le temps et les moyens humains que cela nécessiterait.

D'autres options ont été développées pour mesurer le service de pollinisation sur de très grandes étendues spatiales (pays entier, voire davantage) mais elles n'ont pas été testées à l'échelle de territoires. La réflexion menée dans ce travail se fera à l'échelle d'un territoire agricole ; elle s'appuiera sur la première et la quatrième définition proposées par Bartholomé et al. (2019) en particulier via deux de ces indices sélectionnés comme base de travail de ce stage. Le premier indice est un indicateur indirect (Bartholomé et al. 2019) qui repose sur des connaissances écologiques et cartographiques des pollinisateurs et de leur milieu. A l'échelle européenne, une cartographie du service de pollinisation a été réalisée (Zulian et al. 2013). Elle modélise de la probabilité de présence de pollinisateurs sur le territoire pour pouvoir ensuite estimer le service de pollinisation. Cette répartition potentielle des pollinisateurs tient compte des milieux les plus favorables pour qu'ils assurent leur cycle de reproduction. Ces milieux les plus favorables sont définis grâce aux sites de nidifications préférentiels et la ressource florale du milieu lui-même et des milieux environnants (Sharp et al. 2018). Cet indice sera qualifié d'indice de la pollinisation potentielle. Le second indice adopte une approche inverse et part du rendement des cultures pour revenir au service de pollinisation qui a pu avoir lieu sur les plantes cultivées (Martin et al. 2019). Il sera qualifié d'indice du service de pollinisation réalisée. L'indice du service de pollinisation réalisée repose sur l'action des pollinisateurs sur les rendements des différentes plantes cultivées du territoire, avec des niveaux de dépendances aux pollinisateurs différents.

4. Problématique et objectifs du stage

Déterminer les variations des services de pollinisation à l'échelle d'un territoire apparaît donc comme une donnée très importante dans la mise en place future d'infrastructures et de modes de gestion adaptés (Garibaldi et al. 2014). Le but sur le long terme est de déterminer si un changement de pratiques agricoles vers une agriculture dite plus respectueuse de l'environnement permet une amélioration des services de pollinisation et donc des rendements associés. Avant de remplir cet objectif, il faut savoir s'il est possible de quantifier et qualifier précisément les services de pollinisation à l'échelle d'un territoire agricole. Cela permettrait de déterminer quelles zones sont les plus favorables à la culture de plantes à fleurs. En dépassant cette notion d'utilisation du service de pollinisation pour les rendements, on pourrait déterminer quelles sont les zones au service de pollinisation faible et donc celles sur lesquelles il faut concentrer les efforts de mise en place d'environnements favorables aux pollinisateurs. En effet, conserver une biodiversité fonctionnelle est à la fois crucial pour le bon fonctionnement des écosystèmes et pour les services qu'elle peut apporter aux humains.

Ce travail a pour but de combler les lacunes existantes en termes d'indices de pollinisation, entre une étude fine de la pollinisation à l'échelle des plantes individuelles et une approche à très large échelle. Ce projet d'analyse d'indices de pollinisation à l'échelle de territoires cherche donc à déterminer les résolutions spatiales de travail pertinentes pour deux indices sélectionnés et d'étudier leurs relations aux variables environnementales susceptibles d'influencer les pollinisateurs et la pollinisation.

Nous nous interrogerons sur les questions suivantes dans le corps de ce travail :

- Nous analyserons tout d'abord comment se comporte la déclinaison d'indices de pollinisation nationaux à l'échelle d'un territoire agricole.
- Dans un second temps, cette analyse nous permettra d'étudier ces deux indices censés représenter un même service de pollinisation mais basés sur des jeux de données totalement différents. Nous nous questionnerons sur la possible corrélation qui peut exister entre ces deux indices.
- Nous nous interrogerons ensuite sur la variabilité temporelle que peut suivre l'indice de pollinisation réalisée et des possibles corrélations qu'ils peuvent montrer avec certaines variables météorologiques.
- Enfin, la variabilité spatiale des indices est étudiée plus précisément et un questionnement sur la corrélation entre variables environnementales paysagères (i.e. pourcentage d'habitats semi-naturels...) et de pratiques (i.e. dose d'herbicides...) et indice de pollinisation sera menée.

II. Matériels et méthodes

1. Territoire d'étude : secteur de Fénay (zone d'étude de l'INRAE de Dijon, mosaïque de grandes cultures).

a. Présentation générale du territoire

La plateforme paysagère de Fénay se compose de 140 parcelles de grandes cultures contiguës (950 ha au total) dans la plaine de Dijon (Figure 2). Les principales plantes cultivées sur cette zone d'étude sont le blé tendre, l'orge, le soja, le colza, le tournesol auxquelles vient s'ajouter une particularité du territoire qui est la forte présence de la moutarde brune. Vingt-cinq agriculteur·rice·s y sont installé·es. Les systèmes de cultures sont variables entre les différentes exploitations, ce qui permet d'analyser un certain gradient dans l'intensité des pratiques culturales. L'UMR Agroécologie s'est investie dans le suivi annuel de la plateforme depuis 2008. Les données agronomiques (enquêtes annuelles) et biologiques de la plateforme sont intégrées dans une base de données spatialisée. Le paysage agricole de Fénay présente une hétérogénéité de structures avec une proximité variable entre milieux semi-naturels, infrastructures humaines et parcelles agricoles étudiées comme le montre la Figure 2.



Figure 2 : Cartographie de la plateforme paysagère de Fénay

b. Données de rendement des cultures

Des données de rendements sur la période 2004-2019 ainsi que le parcellaire annuel ont été fournis par Sandrine Petit-Michaut. Un nettoyage de la base de données (illustré sur le Tableau 1) a été réalisé afin de ne conserver que les parcelles pour lesquelles les cultures et les données de rendements étaient renseignées et non égales à 0. Après une attribution géographique des données de rendements, le jeu de données contient 1215 parcelles exploitables avec rendement. Cette base de données comprend 79 noms de cultures uniques.

Opérations effectuées	Nombre de parcelles disposant de l'ensemble des données
Base de données de départ	2404
Suppression des cultures non renseignées	2357
Suppression des parcelles ne disposant pas d'informations sur les rendements	1537
Suppression des cultures dont le rendement dépend de la partie végétative (betterave, pomme de terre ...)	1464
Suppression des parcelles non géoréférencées	1215

Tableau 1. Tableau résumant le tri des données fournies par l'INRAE de Dijon

Afin de comparer l'échelle territoriale et des échelles plus larges, la base de données Agreste, issue du service statistique ministériel de l'agriculture, a également été mise à contribution. Cette base de données renseigne les données de rendements pour les principales cultures française à l'échelle nationale, régionale et départementale.

c. Données d'occupation des sols

J'ai réalisé une carte d'occupation des sols pour renseigner l'ensemble des milieux présents sur le site en prenant en compte à la fois les milieux agricoles et l'ensemble des autres milieux : semi-naturels comme anthropisés. La carte d'occupation a été produite à l'aide du package ALM (Automated Landscape Mapping) développé par l'INRAE avec deux jeux de données au format vectoriel disponibles librement sur Internet. Pour sa précision sur les occupations agricoles des sols, le Registre Parcellaire Graphique (RPG) de 2006 à 2019, couche de référence pour l'instruction des aides à la politique agricole commune (PAC) a été utilisé comme couche principale. Dans une partie de l'étude, les données d'assolement de l'UMR Agroécologie ont été utilisées à la place du RPG afin de cibler spécifiquement les parcelles sur lesquelles des données sont disponibles. Dans un second temps, les données d'Occupation du Sol (OSO), développées par le Centre d'Expertise Scientifique « Occupation des sols » ont été utilisées pour combler l'ensemble des milieux non renseignés sur le RPG. Les données OSO sont issues de photo-interprétations automatisées, basées sur des séries d'images de haute résolution (Sentinel-2 pour le moment). La nomenclature OSO comprend 23 classes dont 12 ne sont pas des occupations agricoles.

La cartographie réalisée sur la zone du Fénay est composée de 87 utilisations du sol différentes (Annexe 1). La grande majorité est composée de milieux agricoles (79 des 87 catégories), le reste étant des milieux semi-naturels (différentes forêts notamment) ou bien des emprises totalement anthropisées (zones urbaines, zones industrielles, routes notamment). La couche vectorielle obtenue après ALM est ensuite transformée en raster avec une résolution spatiale de 2 m pour conserver la précision de l'information initiale.

d. Données météorologiques

Les données météorologiques sont issues de la station météo d'Epoisses (INRAE) qui se situe sur la zone d'étude de Fénay. À partir des données brutes, le nombre de jours consécutifs de sécheresse (durée de la plus longue canicule sur l'année), nombre de jours de canicule et précipitations totales ont pu être calculés. Le seuil de 34°C en température maximale le jour a été retenu pour définir un épisode caniculaire (Besancenot et al. 2006). Deux découpages du jeu de données ont été réalisés, l'un mois par mois, permettant de conserver une information relativement précise et l'autre en découpant les données par tranche de 3 mois pour les faire correspondre aux quatre saisons. Le raisonnement par mois peut conduire à une interprétation plus fine des phénomènes à l'œuvre dans les variations de rendements des cultures. En effet, chaque culture ayant un cycle de développement propre, l'influence d'événement de forte sécheresse ou de fortes pluies durant un mois peut entraîner des conséquences totalement différentes sur les rendements des diverses plantes cultivées. L'exemple de l'épisode de fortes pluies prolongées en 2016 a par exemple eu de graves conséquences sur les rendements de blé tendre en particulier (Ben-Ari et al. 2018). Ce raisonnement ne se fera pas sur une année civile mais sur une « année de rotation » que nous considérerons d'août d'une année t à août de l'année t+1, la majorité des espèces cultivées que nous retrouvons sur Fénay étant des cultures d'hiver.

e. Données de pratiques

Les données disponibles sur les parcelles du secteur de Fénay contiennent des informations sur les pratiques culturales (travail du sol et utilisation de produits phytosanitaires) pour un certain nombre de parcelles. L'utilisation de produits phytosanitaire est caractérisée par l'Indice de Fréquence du Traitement (IFT) à l'échelle de la parcelle. Cet indice comptabilise le nombre de doses de référence utilisées par hectare au cours d'une campagne culturale. Il est calculé comme suit :

$$IFT = \frac{Dose\ appliquée \times Surface\ traitée}{Dose\ de\ référence \times Surface\ de\ la\ parcelle}$$

L'IFT est décliné par grandes catégories de produits sur le secteur de Fénay : herbicides, fongicides, insecticides et acaricides ainsi que les autres produits utilisés. Sur le secteur de Fénay, 72 % des parcelles ont un IFT herbicide connu mais seulement 34 % ont un IFT insecticide renseigné.

2. Calcul de l'indice de pollinisation potentielle

a. Présentation générale de l'indice de pollinisation potentielle

L'indice de pollinisation potentielle repose sur la connaissance de l'écologie des pollinisateurs : niches écologiques préférentielles, périodes d'activité et distance moyenne de butinage. A cela s'ajoute une caractérisation fine du territoire : les ressources florales disponibles et les potentiels d'accueil de nids de pollinisateurs. La Figure 3.A illustre les différents paramètres biologiques pris en compte dans le calcul de cet indice. Le cadre de travail initial est celui développé par Zulian et al. (2013), à partir du modèle de Lonsdorf et al. (2009). La modélisation se basant sur une cartographie complexe, une simplification sera réalisée dans le cadre du stage avec l'utilisation du modèle InVEST pollinisation (Sharp R. et al. 2021). Similairement au modèle Zulian et al. (2013), l'indice InVEST est un modèle de prédiction spatiale renvoyant une probabilité de présence de pollinisateurs. Il permet la réalisation d'une cartographie des présences potentielles de pollinisateurs sur une zone d'étude à l'aide des jeux d'équations développés pour modéliser l'abondance de pollinisateurs (Lonsdorf et al. 2009). La modélisation InVEST renvoie un indice appelé « pollinator supply », qu'on pourrait traduire par une « offre » en pollinisateurs pour une année entière sur chaque pixel d'un raster d'occupation du sol. Cet indice estime également l'abondance en pollinisateurs sur un pixel (une maille de 4*4 m a été sélectionnée pour ce travail après des échanges avec James Daesegher) pour chacune des sous-division temporelles sélectionnées par l'utilisateur. La Figure 3.B résume l'ensemble des paramètres nécessaires au calcul de cette offre en pollinisateurs. Le fonctionnement et les calculs seront détaillés par la suite. Dans cette étude, le « pollinator supply » annuel sera retenu. En utilisant la première définition du service de pollinisation de Bartholomé et al. (2019), l'abondance probable et la diversité (renseignée par l'utilisateur) de ces pollinisateurs permet de rendre compte d'un certain service de pollinisation.

De nombreux paramètres sont donc nécessaires à l'utilisation d'InVEST. L'obtention de la cartographie de l'occupation du sol nécessaire comme base de travail a été décrite précédemment. Seule, cette cartographie ne suffit pas. Il faut lui ajouter les informations concernant les ressources florales et capacité d'accueil de nids de pollinisateurs. Ces informations renseignées par l'utilisateur seront traitées dans la partie b.

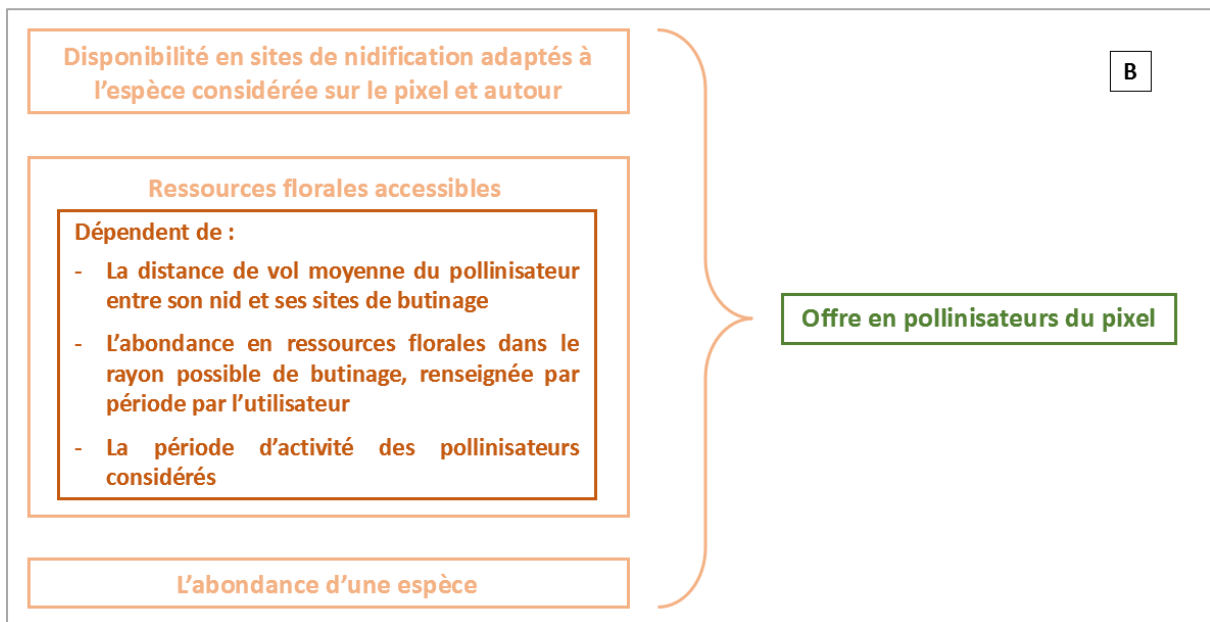
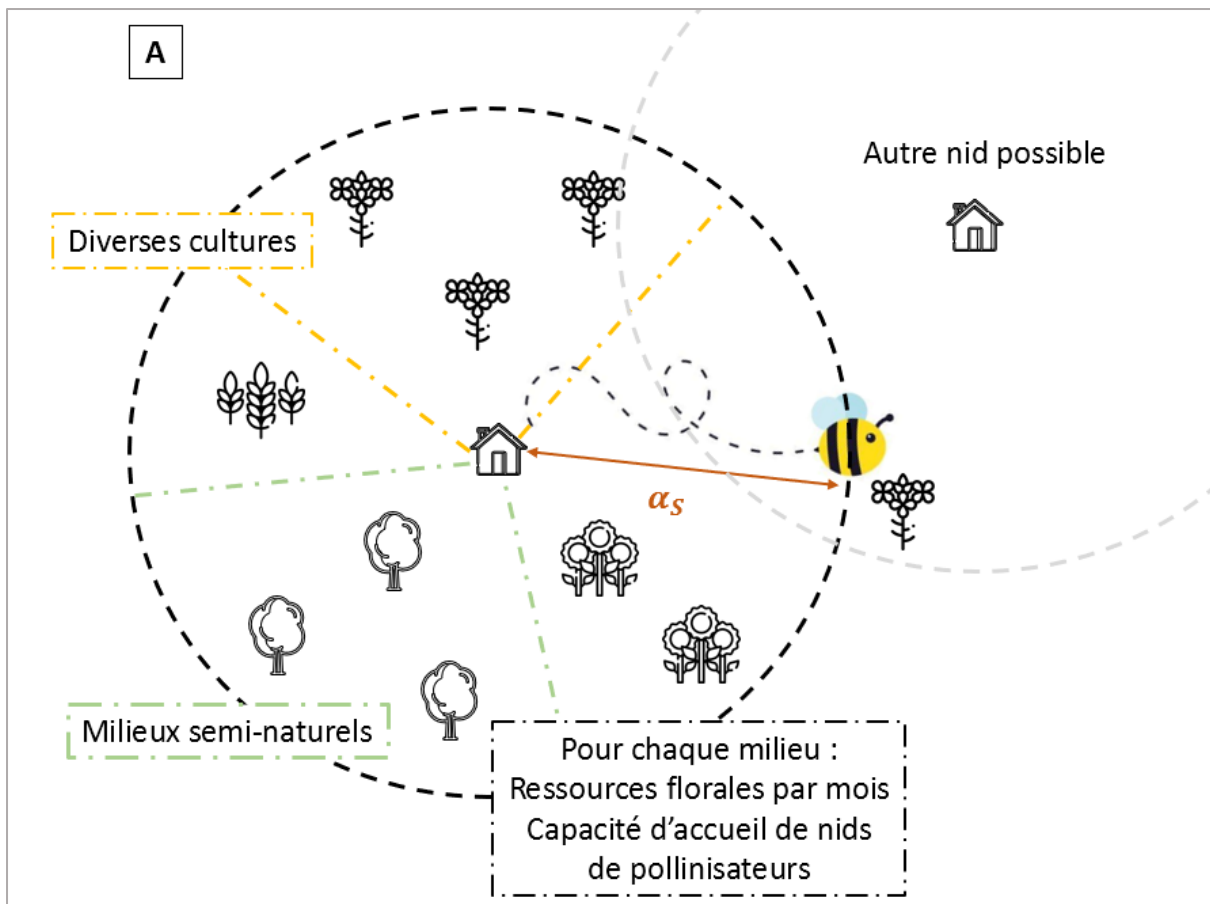


Figure 3. Illustration du fonctionnement de la modélisation InVEST pollination
 A : Schématisation d'un paysage agricole et des paramètres pris en compte dans le calcul de l'indice InVEST. Distance moyenne de butinage pour l'espèce S considérée : α_S
 B : Schématisation des informations nécessaires au calcul de l'offre en pollinisateurs

b. Paramètres renseignés par l'utilisateur nécessaires au fonctionnement d'InVEST

Le raster créé via l'ALM contient l'ensemble des occupations du sol renseigné sur le territoire. À chaque catégorie d'occupation du sol, sont associés un indice de potentiel d'accueil de nidification (décomposé en nids souterrains et nid aériens) ainsi qu'un indice de disponibilité florale pour chaque mois de l'année (Annexe 2). Ces données sont issues des données d'experts utilisées dans les études antérieures (Desaegher et al. 2022) et complétées par un travail bibliographique sur les zones d'études spécifiques de ce stage (CA Bourgogne-Franche-Comté, 2021, 2022).

En se basant sur les travaux existants, les pollinisateurs comme les bourdons sont associés à des éléments linéaires tels que les haies et les lisières de bois, ainsi qu'à des prairies hautes et touffues lors de la recherche de sites de nidification (Fussell et al. 1992 ; Kells et al. 2003). Ces milieux favorables à l'établissement de nids de pollinisateurs ont donc un indice de possibilité de nidification élevé. Les ressources florales quant à elles sont suivies sur les différents milieux mois par mois. La périodicité de la floraison des plantes cultivées et des fleurs des milieux non agricoles est ainsi mise en lumière. Les milieux les plus favorables à l'établissement des pollinisateurs (de par une disponibilité en nids élevés) ne sont pas forcément ceux qui disposent de la ressource florale la plus importante.

Pour les pollinisateurs directement, la période d'activité du pollinisateur (ou guildes de pollinisateurs) et la distance moyenne de déplacement entre le nid et les sites de butinage sont renseignées. Pour cette étude, un pollinisateur moyen a été considéré. Ce pollinisateur moyen a été sélectionné avec une distance de vol de butinage moyenne de 400 m (Greenleaf et al. 2007) et une période d'activité s'étendant de mars à octobre et avec une préférence de nidification souterraine de 98 %. Le modèle InVEST renvoie ensuite une cartographie de l'offre en pollinisateurs à l'échelle du territoire à partir des formules suivantes :

- La ressource florale accessible pour un pollinisateur moyen dont le nid se trouve sur le pixel x est fonction de la facilité de ce pollinisateur à trouver de quoi se nourrir sur ce pixel et sur les pixels environnants à un instant donné dans l'année.

$$Rfa(x) = \frac{\sum_{x'} [e^{-\frac{D(x,x')}{\alpha}} \times \sum_j [RA(x',j) \times PA(j)]]}{\sum_{x'} e^{-\frac{D(x,x')}{\alpha}}}$$

Avec :

$Rfa(x)$: Ressource florale accessible (ici la ressource florale de l'année entière est considérée et sommant les ressources florales des différents mois)

$D(x, x')$: Distance entre le pixel x considéré pour la modélisation et le pixel x' environnant considéré

α : Distance moyenne de vol pour butiner du pollinisateur moyen

$RA(x', j)$: Ressource florale sur le pixel x' à la période j considéré (dans notre cas un mois de l'année)

$PA(j)$: Activité du pollinisateur moyen à la période j

- Le « pollinator supply » est l'offre en pollinisateurs sur un pixel, nous l'utiliserons comme indicateur de pollinisation potentielle. Il prend en compte les ressources florales accessibles à partir de ce pixel, la facilité pour l'espèce considérée de réaliser un nid sur ce pixel et l'abondance relative **AR** l'espèce considérée.

$$PS(x, s) = RFa(x, s)PN(x, s)$$

Avec :

$PN(x)$: Potentiel d'accueil de nid au pixel x pour un pollinisateur moyen

Après exécution de ces équations sur l'ensemble des pixels de la carte, InVEST renvoie un raster contenant l'offre en pollinisateurs sur l'ensemble des pixels.

3. Calcul de l'indice du service de pollinisation réalisée :

a. Présentation générale de l'indice

Dans le calcul de cet indice, la quatrième définition de la pollinisation de la synthèse de Bartholomé et al. 2019 est retenue : « Influence sur le rendement des cultures pour consommation humaine ». Le travail de Martin et al. (2019) permet de définir l'indice du service de pollinisation réalisée. Cet indice repose sur des données de rendements et la connaissance de la dépendance des différentes plantes cultivées aux pollinisateurs. Cet indice permet ainsi de revenir à un service de pollinisation à partir des données de rendements, on pourra qualifier cette approche de rétrospective.

b. Calcul de l'indice du service de pollinisation réalisée

Les travaux de Klein et al. 2007 introduisent les degrés de dépendances de plantes cultivées aux pollinisateurs. Ces degrés se définissent comme la perte de rendement pour certaines espèces en l'absence de pollinisateurs. Ces pertes de rendements relatives à l'absence de pollinisateurs diffèrent largement en fonction des espèces cultivées. Par exemple, les courges vont dépendre très fortement (à 95 %) des services de pollinisation dans la réalisation de leur rendement, tandis que des céréales comme le blé ne dépendent pas des pollinisateurs (Figure 4). L'article de Klein et al. (2007) classe 92 cultures en 4 degrés de dépendances aux pollinisateurs à partir d'un travail de synthèse sur les expériences comparant les mesures de la pollinisation au niveau des fleurs, des inflorescences ou des plantes entières, avec et sans accès aux pollinisateurs. Il est à noter que ces classes de dépendances ont été réalisées à partir de données mondiales et que des variations locales, notamment liées aux pollinisateurs présents ou aux variétés cultivées existent. En usant de ces différents degrés de dépendance aux pollinisateurs, il est possible d'estimer un indice de pollinisation en considérant les rendements en fonction du degré de dépendance des différentes cultures considérées. Sur le territoire de Fénay, dans les rotations culturales, apparaissent successivement des cultures non dépendantes aux pollinisateurs comme le blé ou l'orge et

des cultures modestement dépendantes aux pollinisateurs (25 %) comme le colza, le tournesol ou la moutarde.

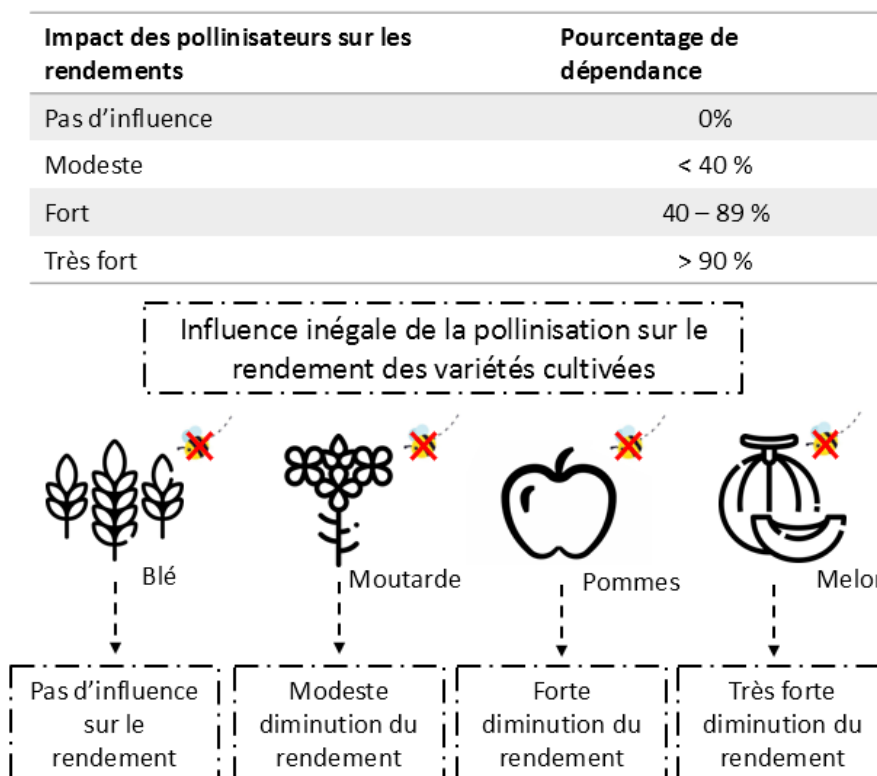


Figure 4. Différents effets des pollinisateurs sur les rendements de différentes espèces cultivées. Les espèces cultivées mentionnées sont données à titre indicatif. Toutes les autres espèces présentes sur le territoire étudié voient également leur degré de dépendance renseigné.

c. Standardisation des rendements

Dans un premier temps, les rendements moyens et les écarts-types de chaque type de culture sont calculés à l'échelle du territoire. Ces moyennes et écarts-types permettent de standardiser (centrer-réduire) les rendements à l'échelle de la zone atelier, pour chaque culture indépendamment. Cette standardisation est essentielle car elle permet de comparer dans un même intervalle des rendements bruts très divers (les rendements de légumes pouvant dépasser les 300 q/ha quand le blé est généralement en dessous de 100 q/ha). Toutes les informations traitées suite à cette standardisation sont uniquement relatives au territoire. Des rendements standardisés positifs traduisent un rendement supérieur à la moyenne territoriale tandis qu'un rendement standardisé négatif traduit un déficit de rendement à l'échelle du territoire. L'intérêt de cette standardisation est également le centrage qu'il permet afin d'obtenir des données de rendements réparties comme montré sur la Figure 5.

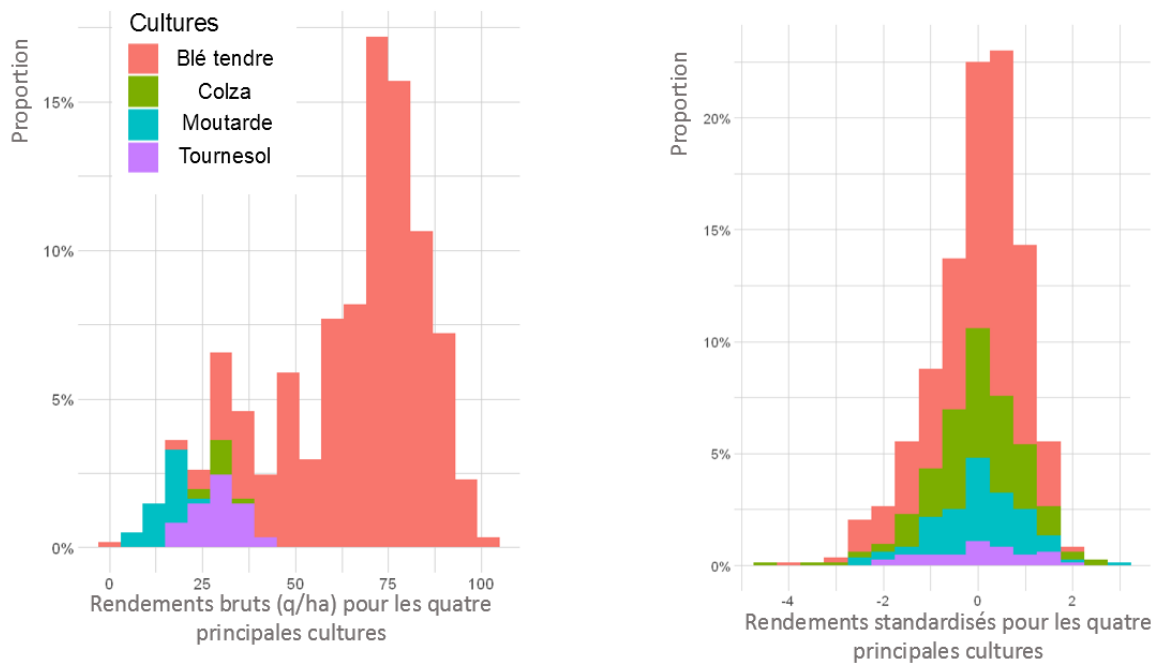


Figure 5. Résultats de la standardisation des rendements sur un jeu de données

d. Découpage spatial du territoire d'étude pour le calcul de l'indice de pollinisation réalisée

Comme détaillé ci-dessous, l'indice de pollinisation réalisée est relatif et permet de comparer différentes zones d'un même territoire entre elles, plutôt que de mesurer la pollinisation de façon absolue. Par conséquent, un découpage du territoire est nécessaire pour calculer cet indice. Le découpage spatial est illustré sur la Figure 6. Le principe même de l'indice de pollinisation réalisée est de calculer les hétérogénéités de pollinisation sur le territoire. Pour une étude de la variabilité spatiale de l'indice, un découpage du territoire en sous-unités permet de regrouper plusieurs données de rendement au sein d'une même entité et d'y calculer l'indice. Une attention particulière est portée sur la diversité des cultures qu'on retrouve dans chaque sous-unité. Il est nécessaire que certaines parcelles aient des cultures dépendantes aux pollinisateurs et d'autres non afin de pouvoir calculer l'indice. Un seuil minimal de deux cultures non-dépendantes et deux cultures dépendantes a été fixé pour constituer chaque sous-unité. La Figure 6 illustre le calcul de l'indice sur chaque sous-unité spatiale du territoire. Sur chacune, une régression linéaire est effectuée : les rendements standardisés des parcelles sont représentés en fonction de la dépendance des cultures aux pollinisateurs. L'indice du service de pollinisation réalisée d'une sous-unité spatiale correspond à la pente de la régression sur ce découpage. Il faut garder à l'esprit que cet indice est calculé relativement à un territoire et que si des moyennes différentes avaient été utilisées pour la standardisation, les résultats auraient pu être très différents.

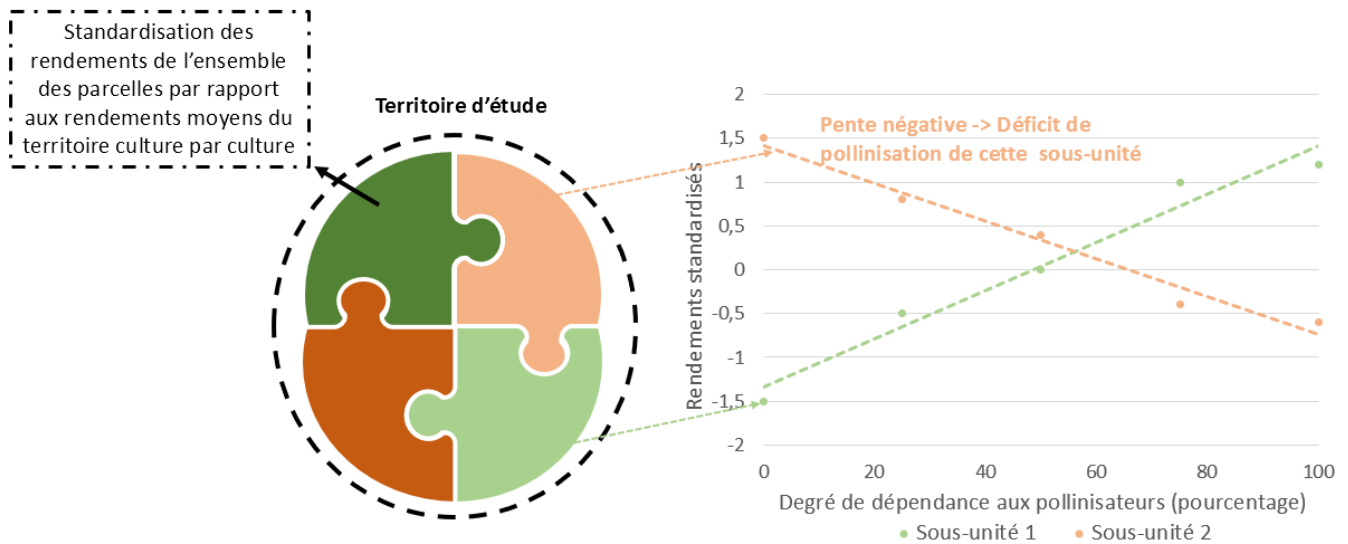


Figure 6. Présentation de la division en sous-unités du territoire d'étude et des régressions pour le calcul de l'indice associé

Cet indice cherche à mettre en évidence les différences d'efficacité de pollinisation qui existent sur la mosaïque du territoire. Les indices sont calculés sur plusieurs sous-unités du territoire distinctes, selon trois approches. Deux approches à larges échelles ont été sélectionnées : par grands clusters de parcelles et par fenêtres glissantes. Une approche plus fine à l'échelle des parcelles elles-mêmes a également été adoptée afin de comparer différentes échelles de découpage spatial du territoire.

i. Approche par clusters

La problématique est ici de déterminer quelles grandes variations peuvent exister au sein de grands regroupements de parcelles. Ces regroupements de parcelles sont pensés de manière à ce que plusieurs parcelles contiguës ne forment qu'un seul ensemble à étudier afin de disposer de plus de données au sein de cet assemblage de parcelles que sur les parcelles individuelles qui peuvent de plus avoir une géométrie variable d'une année sur l'autre. Les parcelles ont été regroupées en optimisant la distance inter-centroïdes. Dix clusters ont ainsi été construits et le calcul de l'indice a été réalisé au sein de chacun de ces groupes. Le nombre de 10 clusters a été retenu car c'est le nombre optimal qui a été déterminé par la fonction HCPC sur le langage de programmation R. L'approche HCPC (Hierarchical Clustering on Principal Components) a pour objectif d'identifier des groupes (clusters) d'objets similaires dans le jeu de données. Cette méthode combine les trois méthodes standards utilisées dans les analyses de données multivariées :

1. Les Méthodes des composantes principales (ACP, AFC, ACM, AFDM, AFM)
2. La classification ascendante hiérarchique
3. Le partitionnement en k-moyennes.

L'objectif est ici d'identifier des clusters de parcelles assez similaires en termes de distance qui les sépare.

ii. Approche par fenêtres glissantes

Les fenêtres glissantes permettent de rendre compte des variabilités de l'indice à large échelle sur le territoire. Le fonctionnement des fenêtres glissantes est schématisé sur la Figure 7. Une taille de fenêtre est sélectionnée par l'utilisateur. Ces fenêtres prennent en compte l'ensemble des points (parcelles) inclus à l'intérieur afin de calculer l'indice de pollinisation réalisée propre à la sous-division « fenêtre ». Dans le cadre de ce travail des fenêtres larges de 2000m*2000m et des fenêtres plus fines de 500m*500m ont été utilisées. Nous avons porté une attention particulière pour que les fenêtres aient une taille permettant d'avoir un nombre donné suffisant pour le calcul de l'indicateur mais qu'elles ne soient pas trop grandes afin de pouvoir réaliser un zonage de notre territoire. Ensuite, une résolution de sortie est sélectionnée par l'utilisateur, elle définira la taille des pixels du raster de résultats par le décalage entre chacune des fenêtres lors du processus de glissement (Figure 7). Les fenêtres ayant une taille plus grande que les pixels du raster de sortie, chacun des pixels se voit recoupé par plusieurs fenêtres lors du « glissement ». La moyenne des valeurs d'indice de pollinisation réalisées calculé sur l'ensemble des fenêtres qui recoupent ce pixel permet de définir l'indice de pollinisation moyen pour ce pixel. Ainsi, chaque pixel est non indépendant des pixels voisins car ils posséderont un certain nombre de fenêtres en communs. Pour cette étude des pixels larges de 500m*500m ont été associés aux fenêtres de 2000m*2000m et des pixels plus fins de 250m*250m ont été utilisés avec les fenêtres de 500m*500m. Cette approche permet d'avoir une approche très large permettant de lisser les informations récoltées, afin d'une part de ne pas pointer du doigt des exploitants en particulier et d'autre part d'établir un gradient lissé du service de pollinisation le long de la zone d'étude.

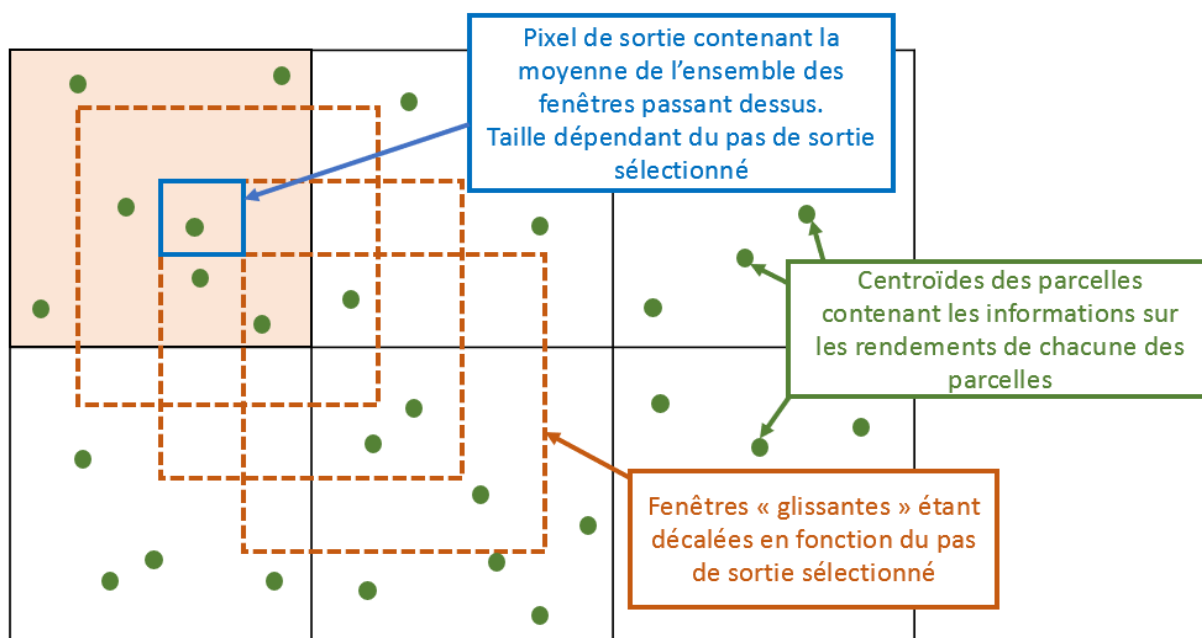


Figure 7. Schéma résumant le fonctionnement des fenêtres glissantes

iii. Approche par micro-parcelle

Une approche fine a été adoptée pour étudier les variables pouvant avoir un effet très localisé sur le service de pollinisation et qui n'apparaissent pas forcément comme explicatives à une échelle plus large. Ce découpage est désigné par le terme de « micro-parcelles » (Yvoz, 2021). Ces micro-parcelles correspondent à des unités de gestion stables dans le temps. Par exemple si un·e agriculteur·rice décide de séparer une parcelle d'un seul tenant en deux, nous conserverons les deux plus petites parcelles ainsi créées. Pour obtenir ce découpage, des intersections successives des assolements fournis pour les années étudiées ont été réalisées. Les polygones créés faisant moins de 0,1 ha n'ont pas été retenus dans le but de limiter les soucis de découpage de géométrie découlant de trop petits polygones. Les parcelles maraîchères ont un assolement très variable d'année en année. Le travail d'intersections successives ne peut pas être mis en place sur ces parcelles en particulier car il aboutit alors à la création de très nombreuses micro-unités résiduelles. Les parcelles se trouvant entre Fénay et Chevigny ne seront donc pas traitées dans cette approche spatiale. Dans un but de comparaison, les approches d'indicateur de pollinisation potentielle et de pollinisation réalisée via cluster et fenêtres glissantes pourront être projetées sur les micro-parcelles afin de réaliser des raisonnements à l'échelle de la parcelle.

e. Découpage temporel et analyse des variations interannuelles de l'indice

Au-delà des variations spatiales, l'indice du service de pollinisation réalisée permet aussi de caractériser des variations interannuelles du service de pollinisation. Ce découpage temporel prend en compte l'ensemble des rendements standardisés d'une année sur le territoire. Le calcul de l'indice du service de pollinisation réalisée est alors fait sur l'ensemble du territoire et les divisions nécessaires au calcul de l'indice deviennent les années (entre 2006 et 2019), remplaçant ainsi les sous-unités spatiales présentées précédemment. Ces analyses temporelles ont pour but de mettre en lien les variations de l'indice de pollinisation réalisée avec les variations des données climatiques sur la zone.

Par ailleurs, une analyse des variations de l'indice de pollinisation réalisée à l'échelle du territoire comparée aux variations observables sur les données Agreste à l'échelle départementale et nationale a été menée. Ces données Agreste sont celles utilisées par Martin et al. (2019) et s'étendent jusqu'à 2017. L'analyse comparative entre les différentes échelles sera donc menée de 2006 à 2017. Une sélection des cultures communes entre le territoire de Fénay et l'échelle nationale a été réalisée. L'analyse des variations interannuelles de l'indice met en exergue le poids très important que peuvent avoir les cultures très dépendantes sur les variations de l'indice de pollinisation réalisée. Ces cultures étant très rares (moins de 10 parcelles renseignées) dans notre jeu de données, elles possédaient un effet levier très important ; il a été décidé de les supprimer des analyses.

4. Analyses statistiques des indices

a. Extraction et calcul de variables environnementales susceptibles d'influencer les pollinisateurs ou la pollinisation

i. Milieux semi-naturels

Les relations entre milieux semi-naturels et indices de pollinisation sont étudiées de deux façons. Dans un premier temps, la distance entre la parcelle et le patch d'habitat semi-naturel le plus proche (fourchette de distance : 0-759 m) est analysée. Une relation linéaire a été adoptée pour modéliser cette relation entre pollinisation et distance aux milieux semi-naturels (Jakobsson et al. 2014). Dans un second temps, la proportion d'habitats semi-naturels dans les zones tampons autour de chaque point d'étude (400 m autour de chacune des micro-parcelles : distance de vol retenue pour le modèle InVEST; fourchette de proportion : 0-45 % d'habitats semi-naturels) est calculée autour des parcelles ou micro-parcelles du territoire. Ces deux façons de prendre en compte les milieux semi-naturels sont étudiées indépendamment et les interactions sont également étudiées.

ii. Pratiques culturales

L'approche de découpage du territoire par micro-parcelles permet de mettre en lumière la relation entre pratiques culturales et variations de l'indice de pollinisation. A l'aide des données récoltées sur les pratiques agricoles par parcelles, elles ont été estimées sur les micro-parcelles pour l'ensemble de la période étudiée. Pour les IFT et l'intensité du travail du sol, une moyenne des données disponibles a été réalisée. Les données de pratiques n'étant pas disponibles sur l'ensemble des parcelles, cela limite le nombre de micro-parcelles pouvant être utilisées pour étudier la relation entre indice de pollinisation réalisée et pratiques culturales. Le Tableau 2 illustre le nombre de micro-parcelles contenues dans le jeu de données en fonction des informations sélectionnées.

Opérations réalisées	Nombre de micro-parcelles
Sélection des micro-parcelles disposant de plus de deux cultures dépendantes et deux cultures non dépendantes aux pollinisateurs	98
Ajout des données d'IFT herbicides	98
Ajout des données d'IFT insecticides	40

Tableau 2. Nombre de micro-parcelles pouvant être utilisées en fonction des informations ajoutées sur les 213 micro-parcelles initiales

b. Analyse statistique

Dans mon travail, les analyses statistiques ont été menées en deux temps. Dans un premier temps, une analyse de la corrélation entre l'indice de pollinisation réalisée et l'ensemble des variables explicatives potentielles est effectuée grâce à l'algorithme des Randoms Forests. Il permet de déterminer les variables les plus importantes pour expliquer les variations de l'indice. Dans un second temps, ces variables

identifiées comme les plus importantes sont étudiées via un modèle linéaire multivarié, ce modèle étant le plus adapté à la distribution de nos données.

i. Random forests

Les random forests sont un algorithme qui permet de réaliser des prédictions en faisant la moyenne d'un ensemble d'arbres de décision comme l'illustre la Figure 8.A. Les arbres de décision sont des arbres de régression dans notre étude spécifique, leur fonctionnement est expliqué sur la Figure 8.B. Pour chacun des arbres, un processus de tirage aléatoire avec remplacement est opéré sur les observations et s'appelle le tree bagging. Il est couplé à un tirage aléatoire des variables s'appelant le feature sampling.

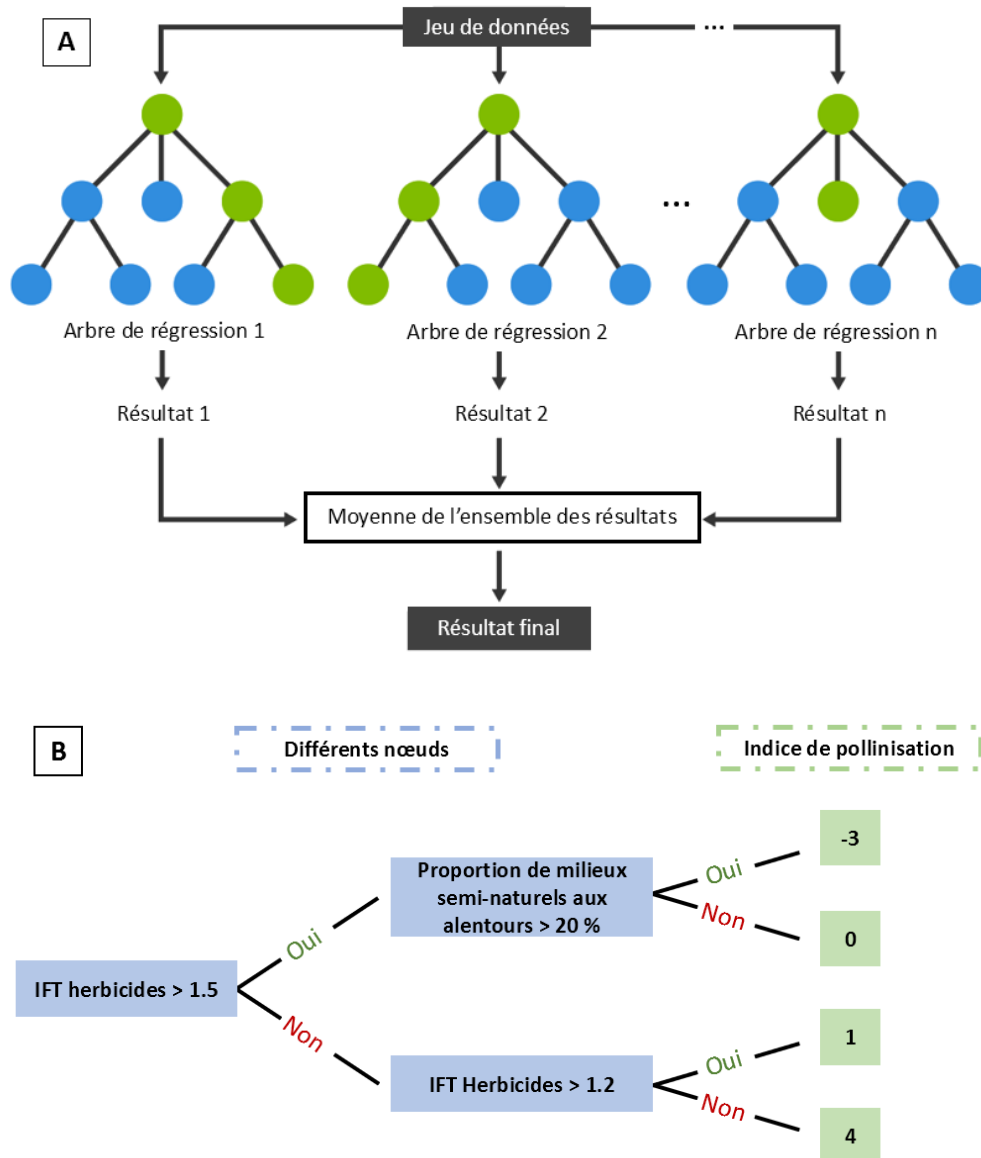


Figure 8. Illustration simplifiée du fonctionnement des randoms forests.

A : Construction de l'ensemble des arbres de régression et résultat obtenu.

B : Un arbre de régression pouvant être construit par l'algorithme des randoms forests

En plus d'être un outil prédictif très puissant, les randoms forests permettent de déterminer l'importance des différentes variables explicatives dans la construction d'une forêt. C'est ce point particulier qui nous intéresse dans l'étude. L'indice de pollinisation réalisée est calculé à partir des rendements et son lien avec les variables environnementales est étudié. Mais nous n'avons pas assez de données pour définir de manière systématique un modèle permettant de caractériser le service de pollinisation en fonction des seules variables environnementales. L'intérêt des forêts aléatoires est alors de prendre l'ensemble des données à notre disposition pour construire un modèle, duquel on extraira les variables explicatives les plus importantes. Le coefficient de chacune des variables ne peut pas être connu avec cet algorithme, mais il permet d'avoir une estimation de l'importance de chacune des variables pour ensuite affiner l'analyse à l'aide d'une régression linéaire multiple.

ii. Distribution et choix de l'outil approprié

Le choix d'une régression linéaire multiple a été fait afin de modéliser la corrélation des variables environnementales avec l'indice de pollinisation. Les résidus de cette régression suivent une distribution gaussienne. La comparaison des deux indices a été réalisée avec une analyse de la corrélation de Pearson, l'hypothèse étant que les deux indices sont corrélés car ils sont censés renseigner sur le même phénomène.

La relation entre milieu semi-naturels et indice de pollinisation a été analysé dans un modèle linéaire avec une conception de modèle mixte :

$$IP_i = a \times PSN_i + b \times DSN_i + c \times PSN_i * DSN_i + Erreur_i$$

Avec :

IP_i : l'indice de pollinisation pour l'observation i

PSN_i : la proportion en habitats semi-naturels à proximité de la parcelle étudiée pour l'observation i et a la pente de la relation entre indice de pollinisation et proportion en habitats semi-naturels ;

DSN_i : la distance minimale entre habitats semi-naturels et la parcelle étudiée pour l'observation i et b la pente de la relation entre indice de pollinisation et distance au milieu semi-naturel le plus proche ;
 c la pente de la relation entre indice de pollinisation et effet combiné de la proportion en habitats semi-naturels et distance au milieu semi-naturel le plus proche.

La relation entre indice de pollinisation réalisée et pratiques agricoles a été analysé dans un modèle linéaire avec une conception de modèle mixte :

$$IP_i = a \times IFTH_i + b \times IFTI_i + c \times TS_i + d * IFTI_i * IFTH_i + Erreur_i$$

Avec :

IP_i : l'indice de pollinisation réalisée pour l'observation i

$IFTH_i$: l'IFT herbicide pour l'observation i et a la pente de la relation entre indice de pollinisation et IFT herbicide ;

$IFTI_i$: l'IFT insecticide pour l'observation i et b la pente de la relation entre indice de pollinisation et IFT insecticide ;

TS_i : le travail du sol pour l'observation i et c la pente de la relation entre indice de pollinisation et travail du sol ;

d la pente de la relation entre indice de pollinisation et effet combiné des deux IFT pour l'observation I

Cette approche pour les pratiques agricoles a été couplées à celle des milieux semi-naturels dans les analyses afin de tenir compte à la fois des pratiques et du paysage.

Pour les variations interannuelles, un modèle simple a été adopté comme suit :

$$IP_{im} = a \times T_{moy_{im}} + b \times T_{max_{im}} + c \times T_{min_{im}} + d \times Prec_{im} + e \times ETPP_{im} + f \times Cani_{im} + g \times DH_{im} + Erreur_{im}$$

Avec :

IP_i : l'indice de pollinisation réalisée pour l'année i et le mois m

Les coefficients de a à g les différentes pente pour les relations entre Indice de pollinisation et variables explicatives

$T_{moy_{im}}$: la température moyenne pour l'année i et le mois m ;

$T_{max_{im}}$: la température maximale pour l'année i et le mois m ;

$T_{min_{im}}$: la température minimum pour l'année i et le mois m ;

$Prec_{im}$: les précipitations pour l'année i et le mois m ;

$ETPP_{im}$: l'évapotranspiration potentielle pour l'année i et le mois m ;

$Cani_{im}$: la durée d'un épisode caniculaire pour l'année i et le mois m ;

DH_{im} : le déficit hydrique potentielle pour l'année i et le mois m ;

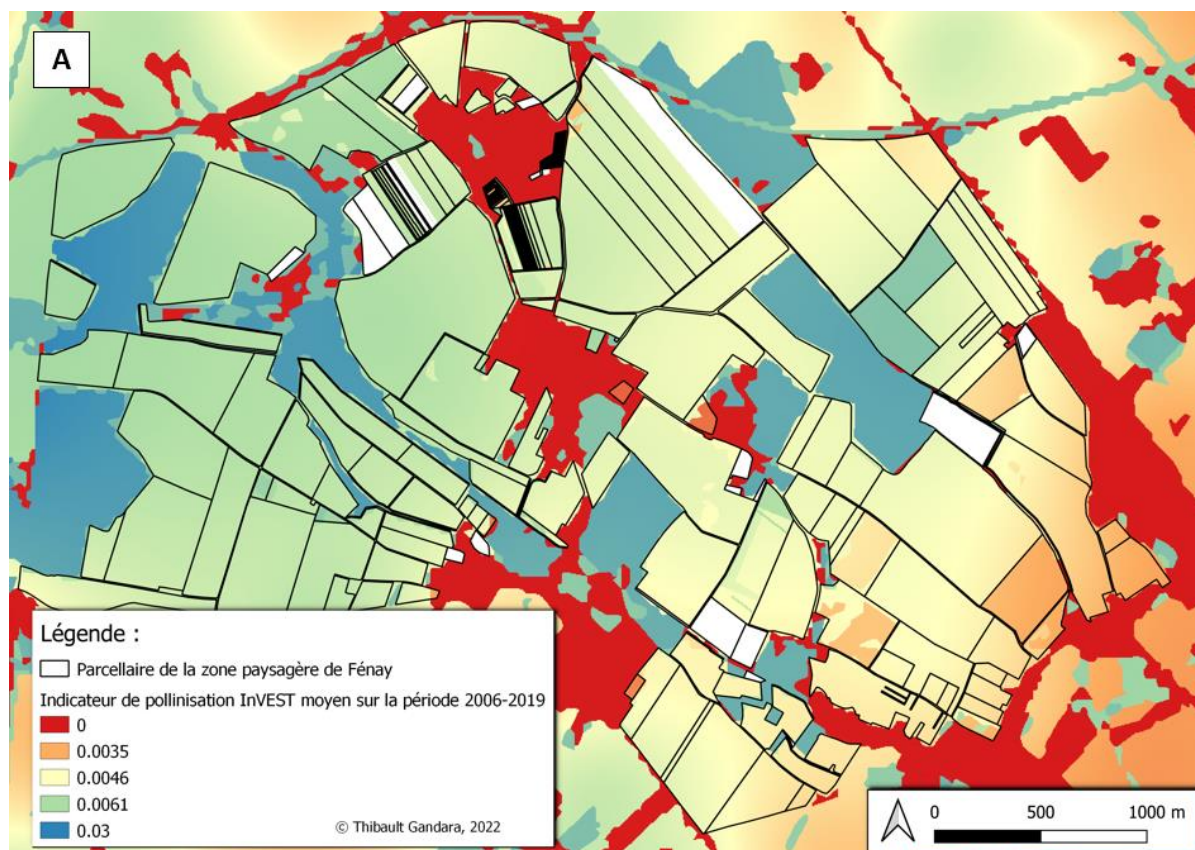
Pour chaque analyse, les valeurs des variables explicatives seront centrées réduites afin de pouvoir comparer les valeurs des coefficients.

III. Résultats

1. Variation des indices à l'échelle territoriale

a. Indice de pollinisation potentielle : InVEST

Se basant uniquement sur les milieux, les calculs réalisés à l'aide d'InVEST montrent de la variabilité spatiale dans l'indice de pollinisation potentielle avec un gradient Est-Ouest marqué sur les parcelles agricoles. Les habitats semi-naturels apparaissent comme très favorables aux pollinisateurs (en bleu sur la Figure 9) et les zones bétonnées apparaissent comme plus défavorables (en rouge sur la Figure 9). Pour les parcelles agricoles, un gradient apparaît de l'Est vers l'Ouest (Figure 9). La variable explicative principale de ces variations d'indice de pollinisation à l'échelle du territoire est le pourcentage de milieux semi-naturels à proximité des parcelles agricoles, ce qui est logique étant donné que le modèle InVEST repose en grande partie sur la présence de sites favorables à la nidification dans le calcul de l'offre en pollinisateurs.



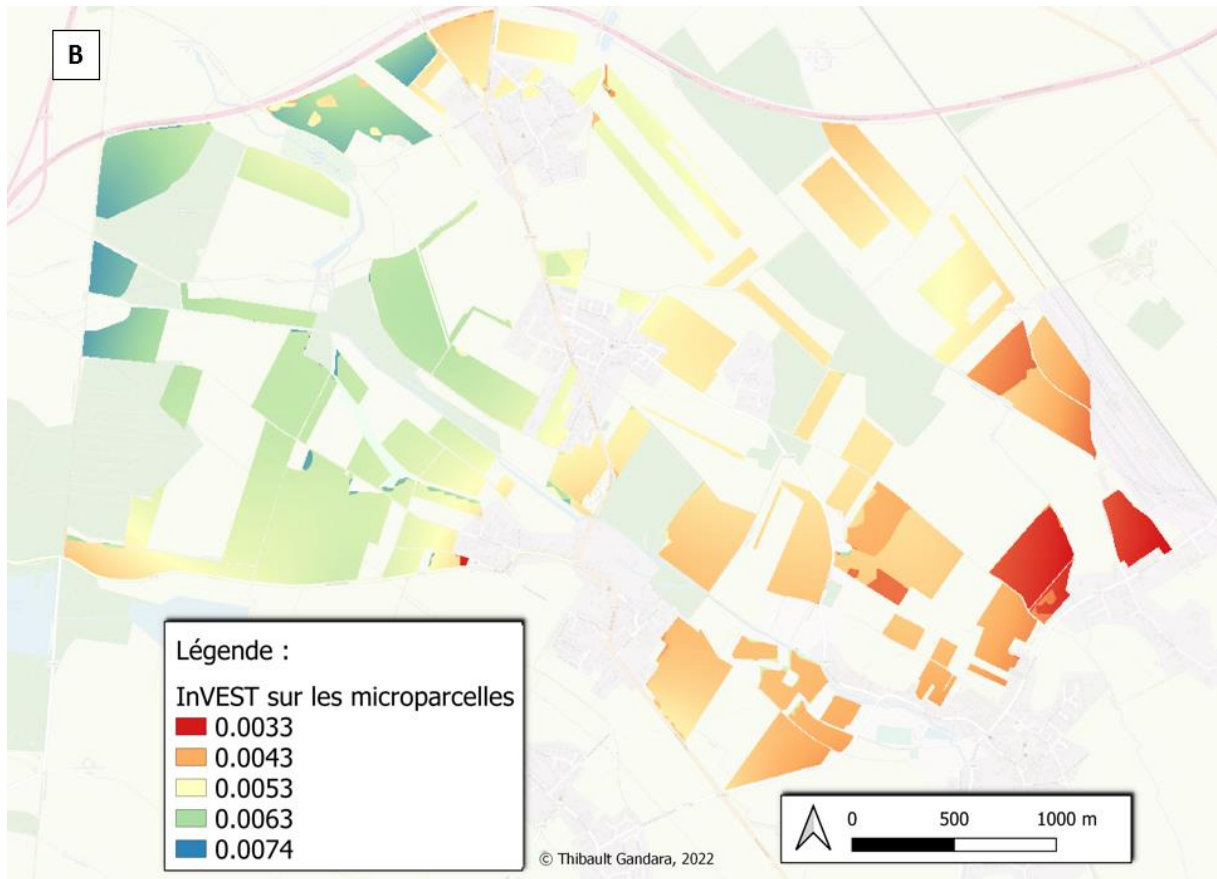


Figure 9 : Carte du service de pollinisation potentiel, basé sur le calcul de probabilité de présence des pollinisateurs InVEST
 A : Cartographie de l'indice de pollinisation potentielle sur l'ensemble de la zone de Fény
 B : Cartographie de l'indice de pollinisation réalisée projeté sur les micro-parcelles uniquement et avec une échelle adaptée

- b. Indice de pollinisation réalisée
 - i. Approche par clusters

L'approche via de larges clusters permet de renseigner les variations sur des groupes parcelles définis par une distance minimale entre leur centroïdes. Ces regroupements montrent une variabilité spatiale (Figure 10) de l'indice de pollinisation sans gradient spatial particulier qui semble se dégager.

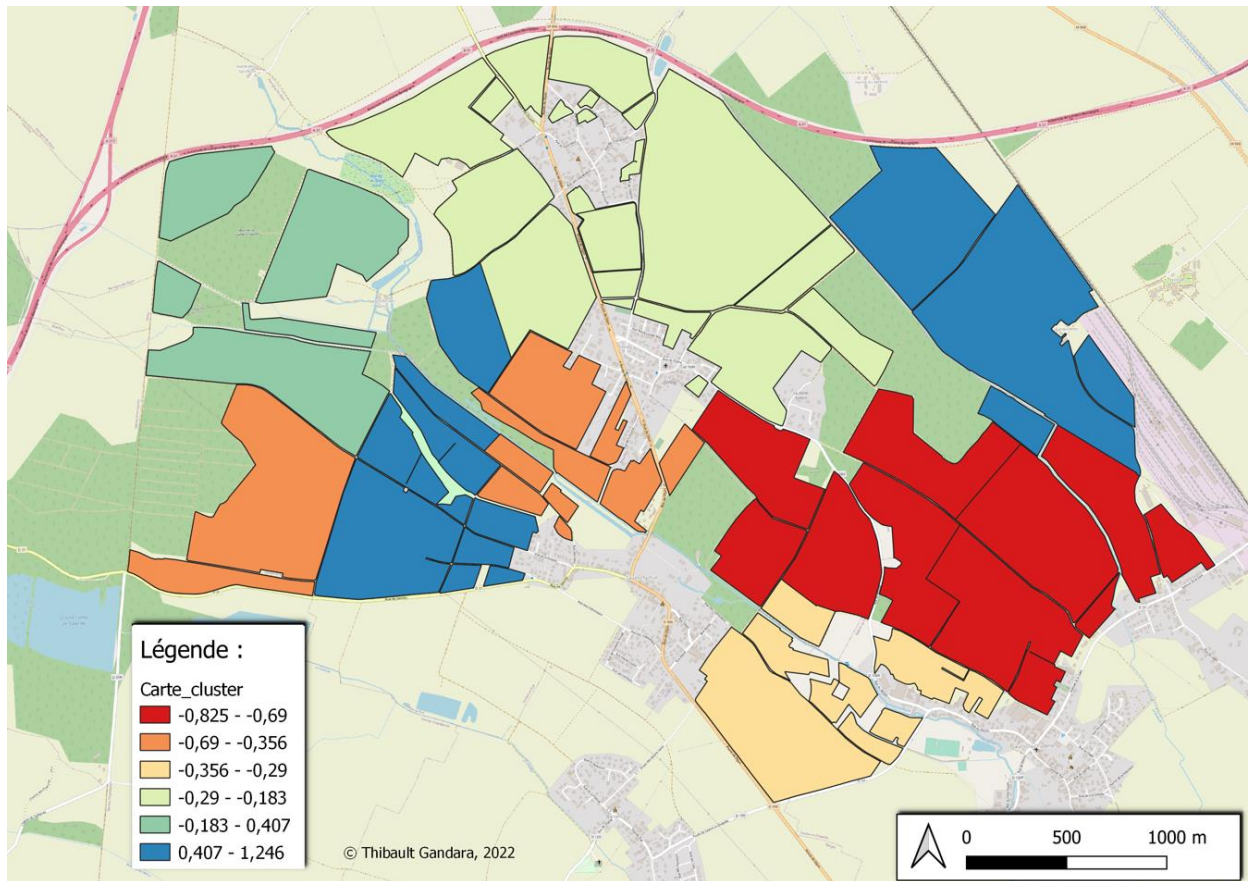


Figure 10. Cartographie de l'indice du service de pollinisation réalisée avec un découpage par cluster adopté.

ii. Approche par fenêtres glissantes

Dans un second temps, nous nous intéressons à un découpage du territoire via des fenêtres glissantes. La Figure 11 montre les variations spatiales de l'indice de pollinisation réalisée sur le territoire. Avec un découpage large (fenêtres de 2000 m * 2000 m) un gradient de variation de l'indice du Sud-Est vers le Nord-Ouest est observé (Figure 11.A). Avec un découpage plus petit (fenêtres de 500 m * 500 m), ce gradient est également observable mais un peu moins marqué avec une zone centrale ressortant comme ayant un mauvais service de pollinisation (Figure 11.B). Globalement, les parcelles au Nord de la zone de Féney ressortent comme celles ayant le service de pollinisation réalisée le plus élevé sur ce paysage agricole.

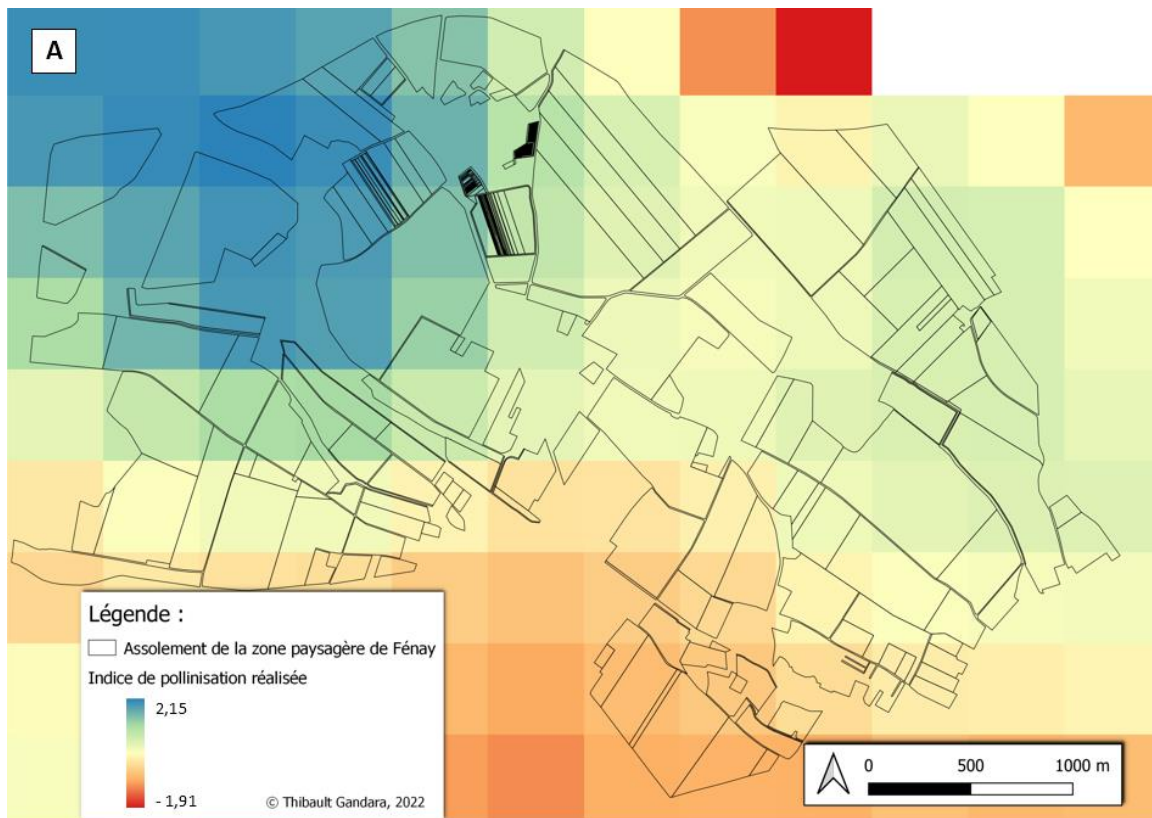


Figure 11 : Calcul de l'indice de pollinisation réalisée à l'aide de la méthode des fenêtres glissantes.
 A. Cartographie réalisée avec une grille initiale de carrés de 2000 m * 2000 m et un pas de 500 m.
 B. Cartographie réalisée avec une grille initiale de carrés de 500 m * 500 m et un pas de 250 m.

iii. Approche par micro-parcelles

Nous considérerons ensuite le calcul de l'indice de pollinisation réalisée avec un découpage plus fin via les micro-parcelles (Figure 12). Aucune distribution spatiale particulière ne semble se dégager dans cette approche.

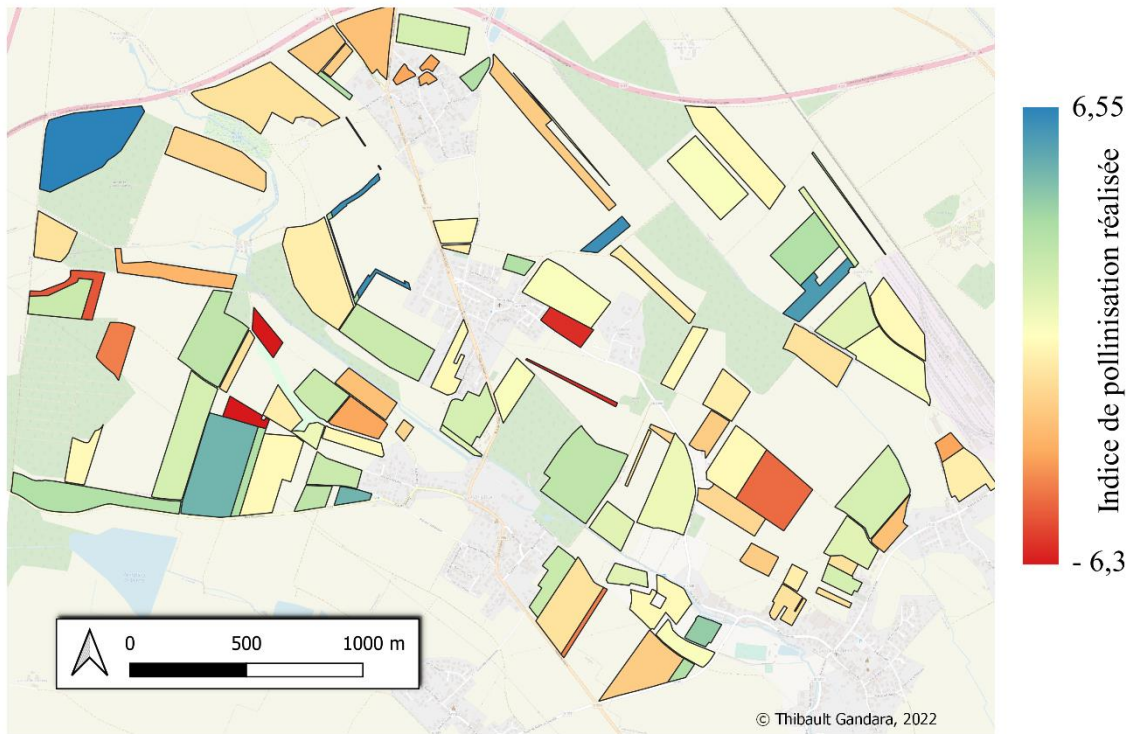


Figure 12 : Indice du service de pollinisation réalisée sur les micro-parcelles

2. Comparaison des deux indices

La Figure 13 permet de comparer visuellement les calculs d'indice de pollinisation aux différentes résolutions spatiales retenues. On peut observer un gradient Est-Ouest sur la plupart des cartes hormis l'approche micro-parcelle (Figure 13.D) qui présente une distribution assez homogène des indices de pollinisation réalisée sur les différentes micro-parcelles. L'approche par cluster et par micro-parcelles ne montrent pas de relation significative lors de la comparaison avec l'indice de pollinisation potentielle. Seules les approches via micro-parcelles affiche une corrélation significative et ce seront donc celles qui seront retenues pour les analyses dans la suite de ce paragraphe.

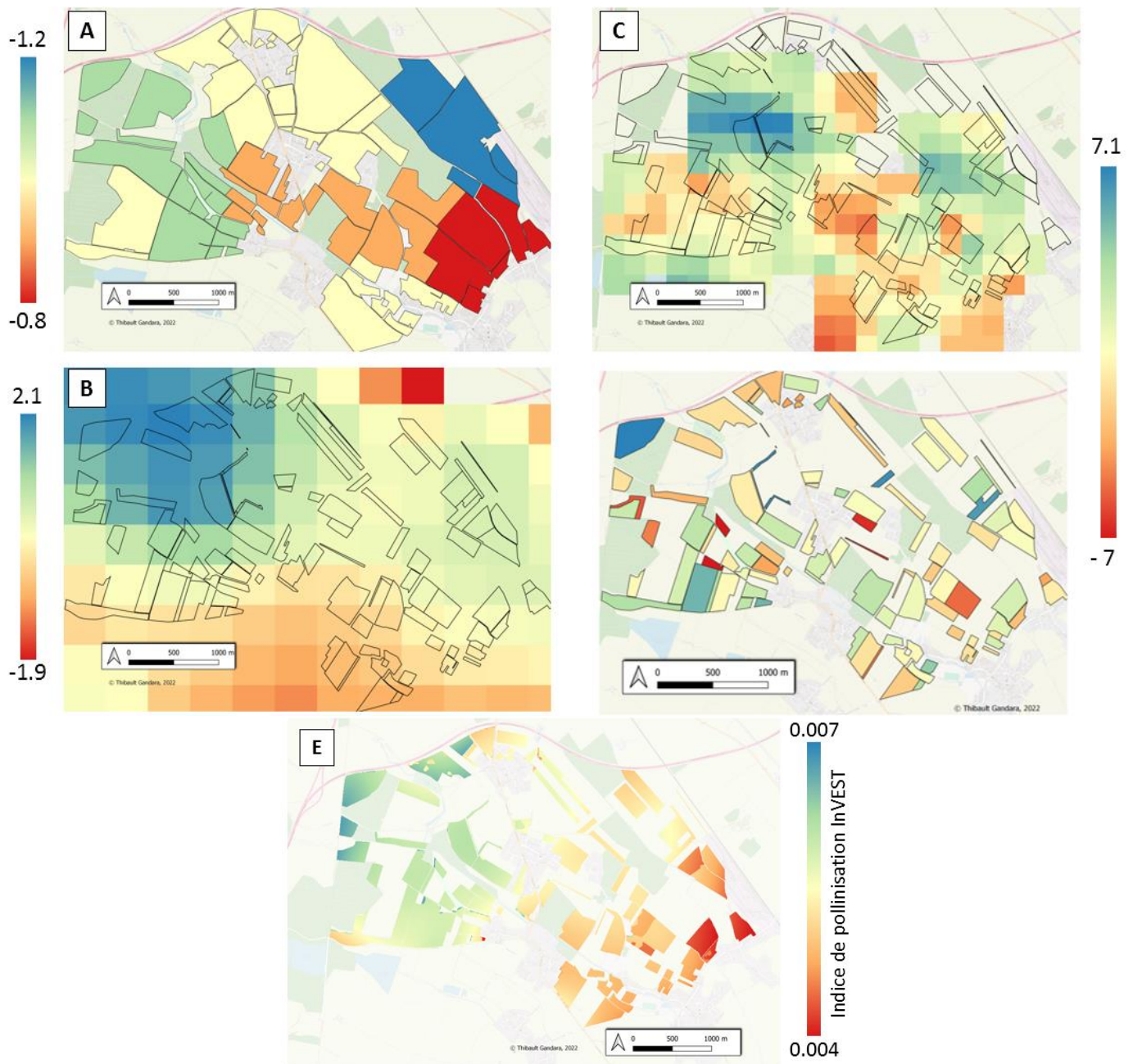
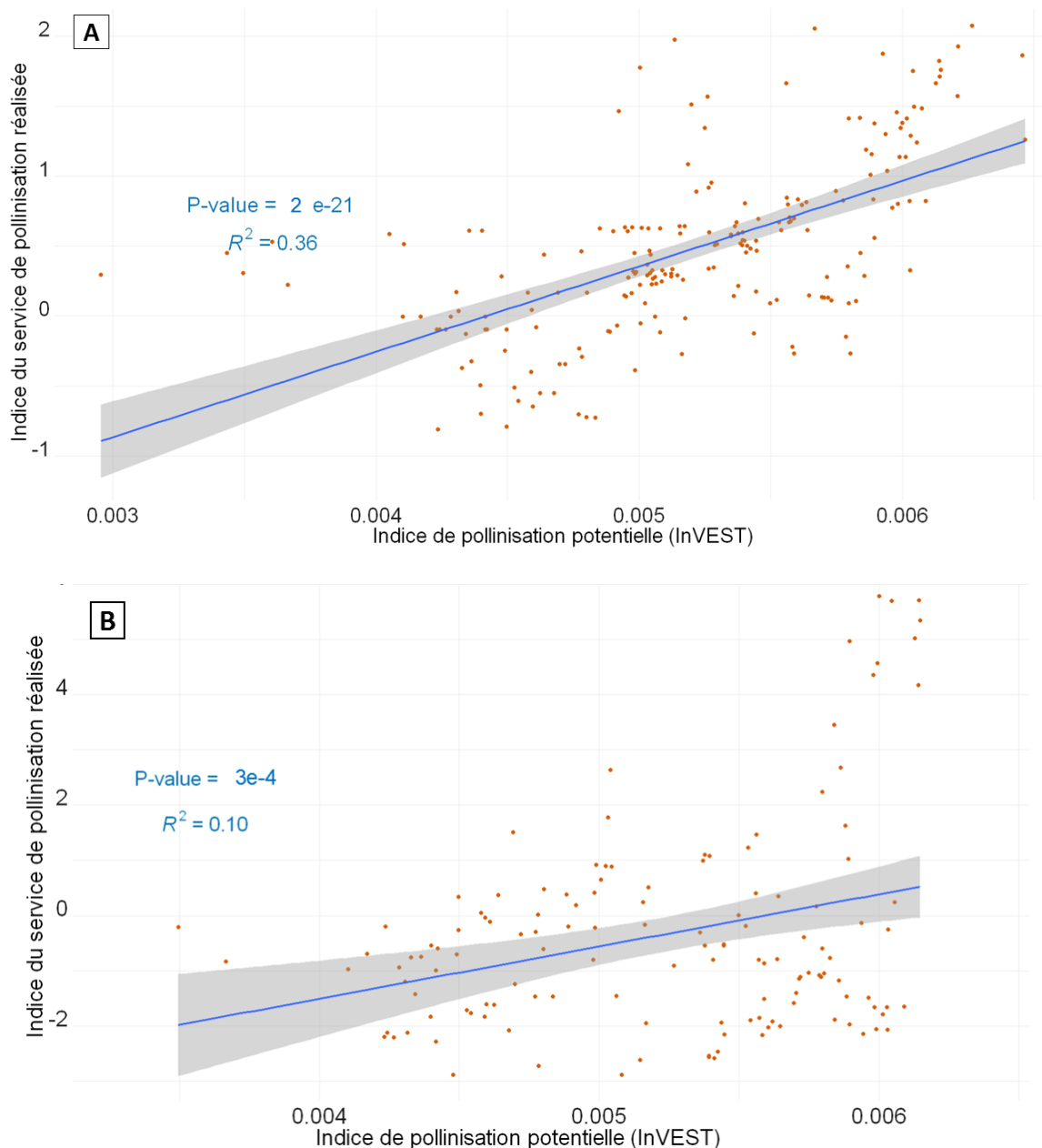


Figure 13. Comparaison des différents calculs de l'indice de pollinisation.

- A. Cartographie de l'indice du service de pollinisation réalisée avec un découpage par cluster adopté.
- B. Cartographie de l'indice du service de pollinisation réalisée obtenue avec l'algorithme des fenêtres glissantes : grille initiale de 2000 m * 2000 m et pas de sortie de 500 m.
- C. Cartographie de l'indice du service de pollinisation réalisée obtenue avec l'algorithme des fenêtres glissantes : grille initiale de carrés de 500 m * 500 m et pas de sortie de 250 m.
- D. Cartographie de l'indice du service de pollinisation réalisée sur les micro-parcelles
- E. Cartographie du service de pollinisation potentielle InVEST projeté sur les différentes micro-parcelles.

La Figure 14 illustre une forte corrélation entre l'indice de pollinisation réalisée estimé grâce à la méthode des fenêtres glissantes et l'indice de pollinisation potentielle testés sur le territoire de Féney. On remarque que les deux indices sont particulièrement bien corrélés quand les fenêtres glissantes sont faites avec la plus grande taille de fenêtres ($R^2=0,36$), le coefficient de corrélation de Pearson est alors de 0,31. Avec des découpages plus petits, la linéarité des deux indices est vérifiée mais le R^2 est moins élevé et le coefficient de corrélation de Pearson également, il baisse à 0,2. Ces résultats sont en accord avec l'observation d'un gradient Nord-Ouest/Sud-Est que nous avons déjà pu remarquer sur les cartes présentées précédemment.

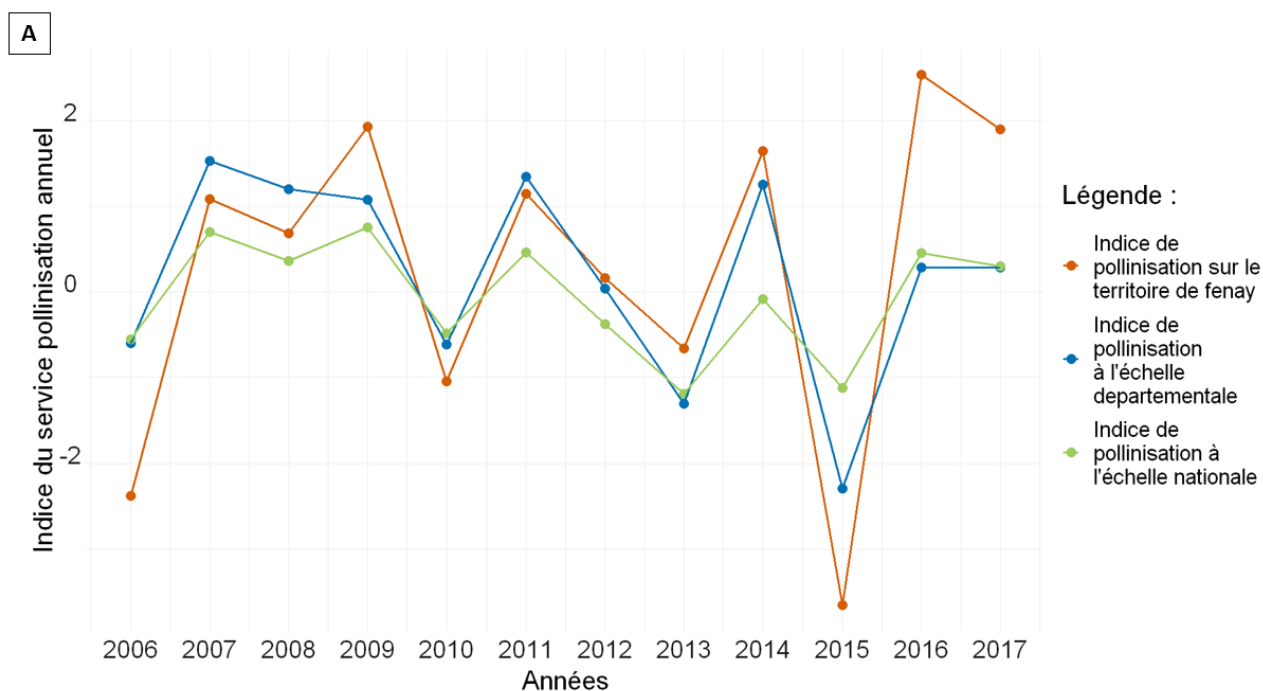


Sur le découpage en micro-parcelles, l'indice calculé directement sur les micro-parcelles ne montre aucune corrélation significative avec l'indice InVEST calculé. Le coefficient de corrélation est de 0,05 et la p-value de 0,6. Pour les clusters la p-value est également supérieure à 0,5 et le coefficient de corrélation égal à 0,08. Cette analyse statistique confirme les observations directes qu'il était possible de réaliser sur la Figure 13.

3. Variation spatio-temporelle des deux indices à l'échelle d'un territoire agricole

a. Etude de la variabilité temporelle de l'indice de pollinisation réalisée

Les variations temporelles de l'indicateur du service de pollinisation réalisée sont importantes. En effet, la Figure 15.A illustre une variation interannuelle de l'indicateur que ce soit à l'échelle territoriale ou bien à l'échelle du département ou du pays. Ces variations aux différentes échelles semblent se suivre et de fait les variabilités temporelles de l'indice de pollinisation aux échelles territoriale, départementale et nationale montrent des corrélations significatives (Figure 15.B.C). Le coefficient de corrélation de Pearson entre calcul de l'indice de pollinisation réalisée à l'échelle du territoire et échelle départementale est de 0.81 et la corrélation entre l'échelle nationale et territoriale est de 0.82.



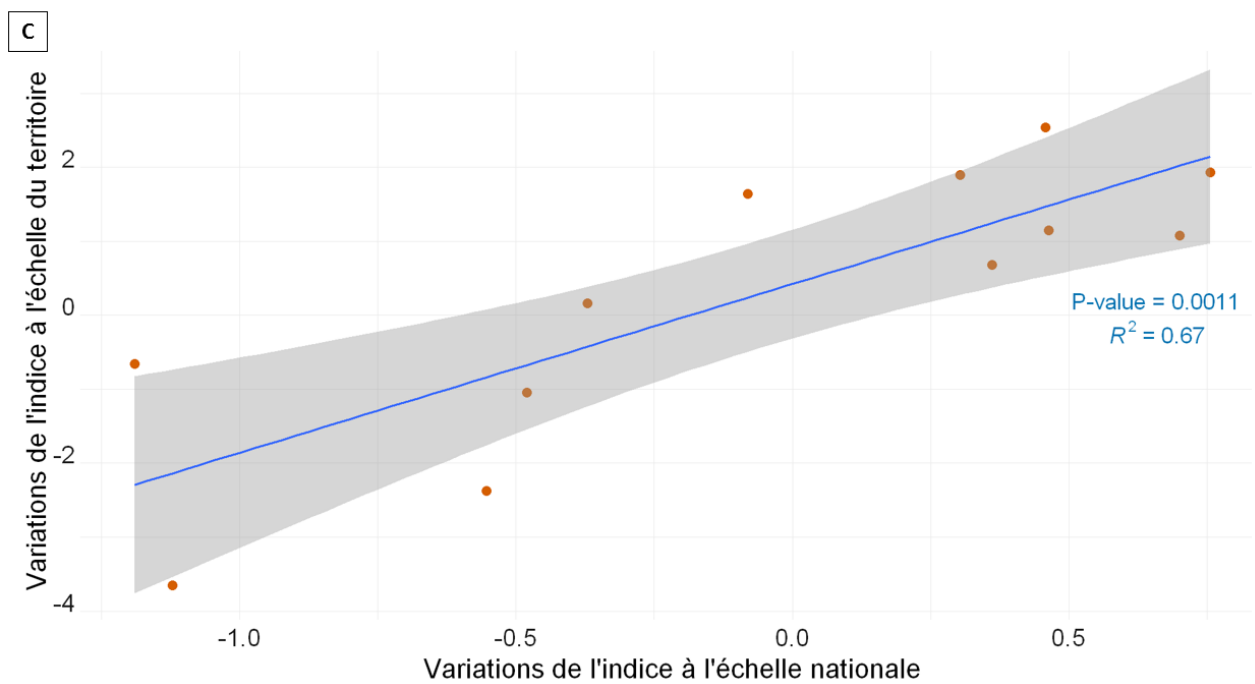
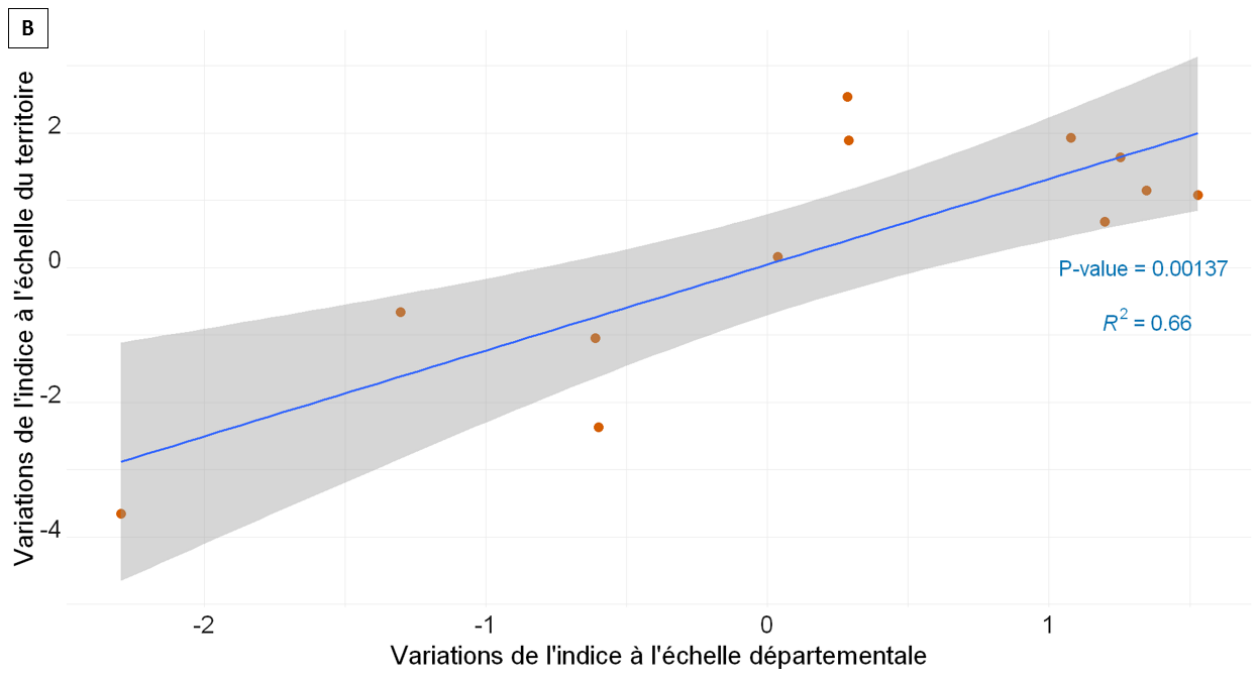


Figure 15. Variations interannuelles (2006-2017) de l'indice de pollinisation sur les différentes échelles d'analyses

- A. Comparaison des variations interannuelles sur les différentes échelles spatiales (territoire, département, nationale). Les indice de chaque année sont reliés pour montrer les variations
- B. Variation de l'indice de pollinisation réalisée à l'échelle du territoire de Fénay par rapport à l'échelle départementale.
- C. Variation de l'indice de pollinisation réalisée à l'échelle du territoire de Fénay par rapport à l'échelle nationale.

L'analyse via un GLM du lien entre variations interannuelles de l'indice de pollinisation et variables météorologiques ne fait ressortir aucune variable comme significative. Le faible nombre d'années par rapport au nombre de variables météorologiques testées ne permettait pas de conserver un grand nombre de degrés de liberté. Prises individuellement ou par petits groupes, une corrélation significative entre certaines variables météorologiques et le service de pollinisation réalisée est observée. Toutes les variables ont été testées et l'ensemble des variables du mois de juillet ressortent comme celles ayant l'impact le plus significatif (Tableau 3).

Variables explicatives	Coefficient	Erreur estimée à 95 %	F-Value	P-Value
ETPP juillet	-2,82	0,55	26.6	2.10^{-4}
Déficit Hydrique juillet	0,03	0,008	14.3	$2,6.10^{-3}$
Température maximale juillet	-0,62	0,19	10.8	$6,5.10^{-3}$
Température moyenne juillet	-0,76	0,24	9.9	$8,5.10^{-3}$
Précipitation juillet	0,034	0,013	7.3	0,019
Température minimale juillet	-0,87	0,38	5.4	0,038

Tableau 3. Variables météorologiques corrélées significativement à l'indice de pollinisation réalisée. Chaque test statistique a été réalisé avec 12 degrés de liberté

L'analyse des données météorologiques sison par saison (regroupements de 3 mois successifs) ne montre aucune corrélation significative avec l'indice de pollinisation réalisée.

b. Variables environnementales corrélées aux variations spatiales du service de pollinisation

i. Etude de la relation entre milieux semi-naturels à proximité et parcelles étudiées.

La Figure 16 illustre une absence de corrélation entre la densité en milieux semi-naturels et l'indice de pollinisation réalisée calculé avec de larges fenêtres glissantes. Pour les autres approches spatiales, la densité en milieux naturels et leurs distances aux parcelles ne sont pas significativement corrélés aux variations de l'indice de pollinisation réalisée.

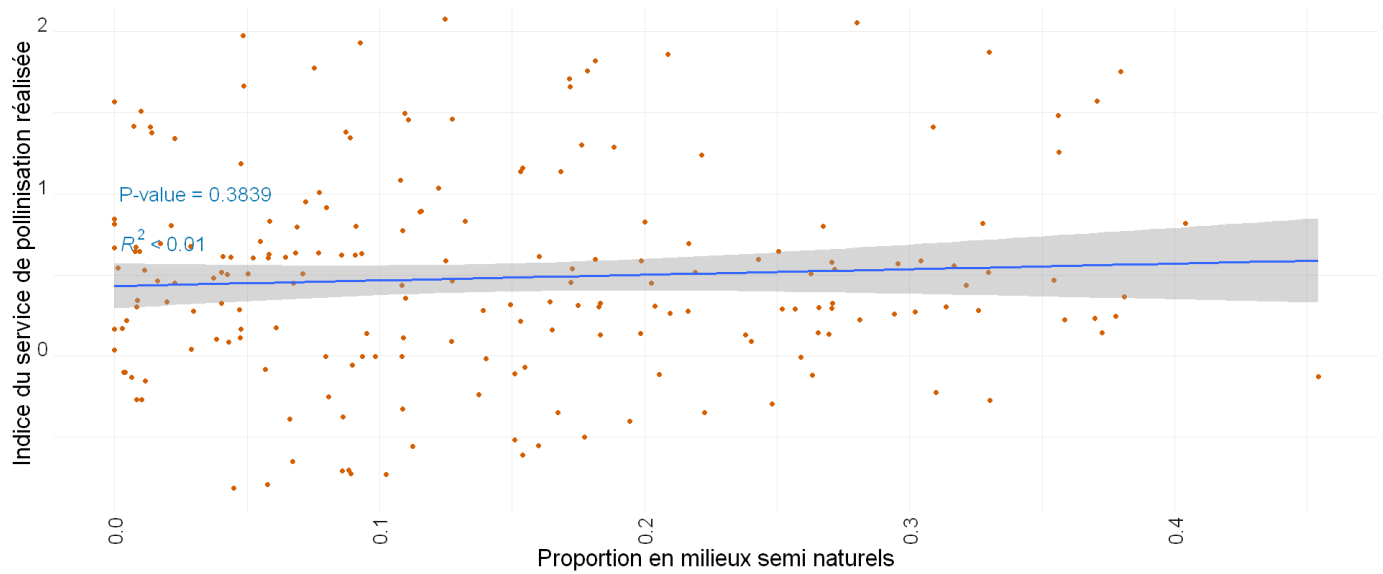


Figure 16. Variation de l'indice de pollinisation réalisée projeté sur les différentes micro-parcelles en lien avec la proportion de milieux semi-naturels à proximité (rayon de 400 m). Approche fenêtre glissante pour des fenêtres de 2000*2000m et un pas de 500 m

ii. Etude de la relation entre pratiques agricoles et indice de pollinisation réalisée

La p-value de la relation entre pratiques agricoles et l'indice de pollinisation réalisée est bien supérieure à 0,05 pour les approches via clusters et fenêtres glissantes. Seule l'approche via les micro-parcelles sera traitée dans cette partie.

L'algorithme des Random Forests retourne les variables explicatives les plus importantes dans le modèle créé. L'IFT herbicides ressort comme variable explicative la plus importante via l'algorithme des Random forests. L'importance des milieux semi-naturels ressort en deuxième avec une forte importance également.

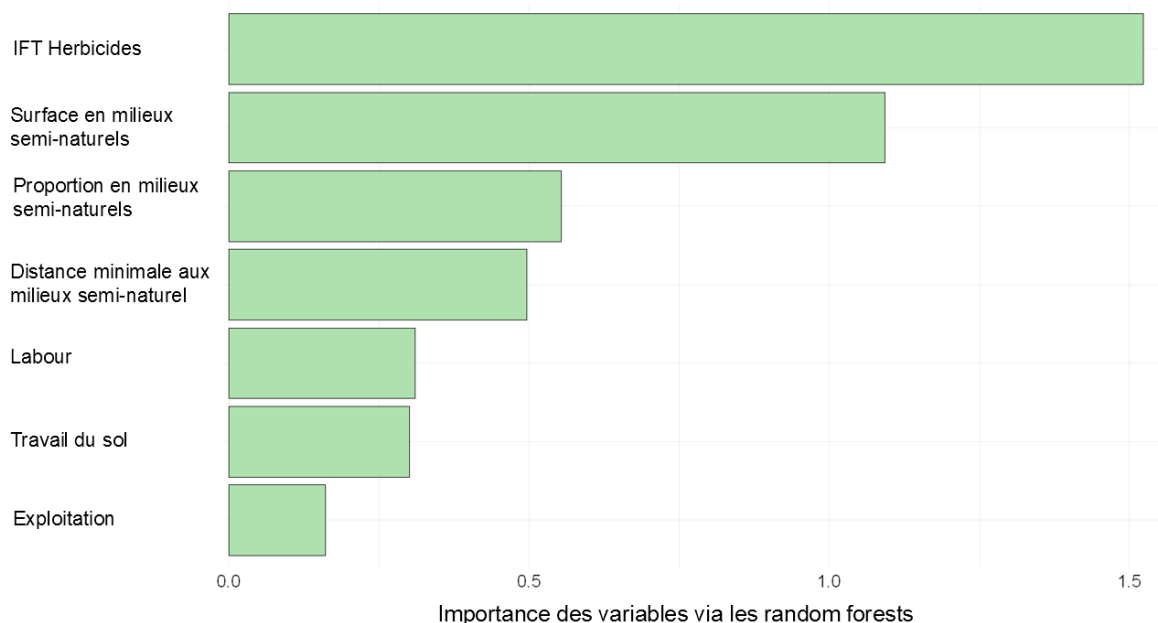


Figure 17. Importance des différentes variables environnementales dans un modèle Random Forest d'explication de l'indice de pollinisation avérée sur 98 micro-parcelles

Ainsi, avec un découpage via des fenêtres glissantes, aucune corrélation n'est observée avec les pratiques culturales. Le découpage spatial via les micro-parcelles montre une décroissance de l'indice de pollinisation avec l'augmentation d'utilisation d'herbicides (p-value = 0,019), mais avec une forte dispersion des données autour de la régression.

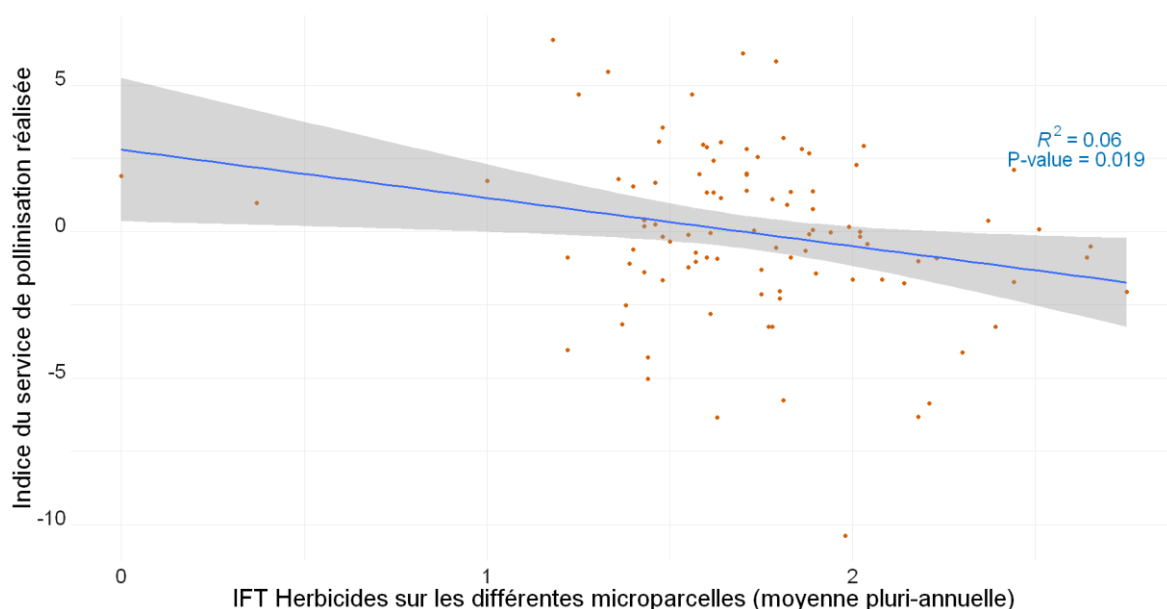


Figure 18 : Evolution de l'indice du service de pollinisation en fonction de l'utilisation d'herbicides

L'utilisation d'herbicides ressort comme principale variable explicative des variations de l'indice à l'échelle des micro-parcelles, avec un effet négatif. La régression linéaire multiple réalisée est résumée dans le Tableau 3. L'IFT herbicide est la seule variable explicative significative et ayant un coefficient

élevé. Il est à noter que l'interaction entre surface de la micro-parcelle et proportion en milieux semi-naturels autour n'est pas significative mais a une p-value de 0,078. Cette observation suggère que la proportion d'éléments semi-naturels du paysage a un effet positif sur l'indice de pollinisation dans les parcelles de petite taille, et que cet effet se réduit lorsque la taille des parcelles s'accroît.

Variables explicatives	Coefficient	F-Value	P-Value	Erreur estimée à 95 %
Surface de la micro-parcelle	0.657	1.664	0.2	± 0.333
Travail du sol	0.19	0.43	0.514	± 0.29
IFT Herbicide	-0.697	6.002	0.0162 *	± 0.285
Proportion en milieu semi-naturels	-0.6271	2.449	0.121	± 0.364
Distance au milieu semi-naturel le plus proche	0.1672	0.193	0.662	± 0.3806
Proportion en milieu semi-naturels x Surface de la micro-parcelle	-0.7677	3.155	0.079	± 0.4322

Tableau 4. Modélisation à effets mixtes des effets des variables locales et paysagères sur l'indice du service de pollinisation réalisée pour une approche par micro-parcelle. Nombre de degrés de liberté : 90. Les étoiles indiquent les niveaux de significativité : * pour P -value < 0,05

Dans le cas de l'utilisation d'insecticides, aucune relation significative n'est observée (Tableau 5). Le jeu de données est assez restreint dans cette étude particulière (uniquement 98 micro-parcelles sur les 210 initiales) et la variabilité de l'indice est relativement élevée.

Variables explicatives	Coefficient	F-Value	P-Value	Intervalle de confiance à 95 %
Surface de la micro-parcelle	0.805	0.340	0.564	± 0.396
Travail du sol	0.612	1.03	0.318	± 0.318
IFT Herbicide	-0.0689	0.0121	0.913	± 0.483
IFT Insecticide	0.316	0.267	0.609	± 0.609
Proportion en milieu semi-naturels	0.459	0.501	0.484	± 0.527
Distance au milieu semi-naturel le plus proche	0.371	0.280	0.600	± 0.600
Proportion en milieu semi-naturels x Surface de la micro-parcelle	-0.493	0.400	0.532	± 0.532

Tableau 5. Modélisation à effets mixtes des effets des variables locales et paysagères sur l'indice du service de pollinisation réalisée pour une approche par micro-parcelle. Nombre de degrés de liberté : 32. P-value : 0.8904. R²=0.0818. Les étoiles indiquent les niveaux de significativité : * pour P -value < 0,05

IV. Discussion

1. L'indicateur de pollinisation réalisée, un indicateur prometteur mais à retravailler pour identifier la résolution spatiale possible et pertinente

a. Les différentes résolutions spatiales montrent des motifs de variation spatiale différents

Dans cette étude, nous avons décliné et comparé deux indices de pollinisation développés à l'échelle nationale (ou supranationale) à une plus petite étendue spatiale : un paysage agricole. Nos résultats fournissent une première estimation de la pertinence des deux indices à l'échelle d'un territoire agricole. Chaque découpage spatial que nous avons pu étudier a montré des variations de l'indicateur de pollinisation réalisée sur le territoire agricole.

La question de la résolution spatiale de travail se pose. En effet, nos résultats montrent qu'une grande résolution spatiale montre moins de variations de l'indice de pollinisation réalisée. Pour le découpage en fenêtre glissantes, le nombre de rendements disponibles dans chacune des fenêtres est plus important que dans une micro-parcelle. Le calcul de l'indice prend donc en compte de nombreuses parcelles qui peuvent avoir des propriétés assez différentes (distance et proportions de milieux semi-naturels environnants, pratiques culturales...). Cela participe au lissage de l'indice, accentué par le fait que les calculs d'indice via les fenêtres glissantes rendent chacun des pixels de sortie dépendant des pixels voisins. La carte obtenue est ainsi lissée mais permet de rendre compte des variations globales de l'indice à l'échelle du territoire. L'indice est alors plus stable (moins de valeurs positives et négatives relativement élevées) et cette résolution spatiale semble plus pertinente pour raisonner sur l'effet du paysage. L'indice de pollinisation avéré sur l'approche micro-parcelles est plus variable car les données pour chaque sous-unité du territoire sont moins nombreuses quand dans de grandes fenêtres.

b. Différents motifs expliqués par des variables environnementales différentes

Les variables paysagères et de pratiques agricoles interagissent différemment avec le service de pollinisation en fonction de l'échelle spatiale considérée ce qui pose la question des effets d'échelles et de quelle échelle conserver pour étudier en particulier certaines relations. D'autres études montrent que la considération de données agricoles à l'échelle de la parcelle ou du territoire dans son ensemble ne fait pas ressortir les mêmes variables explicatives (Philpott et al. 2008). L'étude des paysages agricoles requiert régulièrement l'approche multi-échelles. Des études adoptent une approche combinée entre les différentes échelles en prenant en compte l'échelle de la parcelle pour l'étude statistique des données de terrain qui sera ensuite combinée avec des informations de géomatique récoltées à plus large échelle (Martel et al. 2019). Dans notre cas précis, des résolutions plus larges permettent de concentrer plus de données de rendement dans le cadre du calcul de l'indice de pollinisation réalisée, tandis que les approches via des résolutions plus fines disposent de moins de données, mais sont plus locales et peut être moins représentatives spatialement de ce qui se passe à l'échelle de l'ensemble du territoire.

i. Pratiques agricoles

La résolution des micro-parcelles semble être celle sur laquelle les effets des pratiques ressortent le plus. Ce découpage plus fin rend compte de variations plus locales de l'indice de pollinisation réalisée. Nos résultats montrent une relation significative négative entre utilisation d'herbicides et service de pollinisation réalisée. L'utilisation d'insecticides qu'on pourrait penser comme très néfastes aux pollinisateurs n'est pas significativement corrélée au service de pollinisation réalisée calculé sur la zone paysagère de Féney. A partir de ces résultats, nous pouvons supposer que l'utilisation d'herbicides dans les grandes cultures présente un risque indirect car ils réduisent l'abondance et la diversité des plantes à fleurs fournissant du pollen et du nectar aux pollinisateurs (Gabriel et al. 2007, Bohnenblust et al. 2017). L'importance de ces adventices dans les cultures a montré qu'en Angleterre, les plantes qualifiées de mauvaises herbes nuisibles étaient deux fois plus visitées que les autres (Balfour et al. 2022). De leur côté, les insecticides sont pour la plupart appliqués à des périodes éloignées de la floraison et n'ont donc pas forcément d'impact direct sur les populations de pollinisateurs.

Concernant l'analyse des relations entre pratiques agricoles et indice de pollinisation, l'échelle des micro-parcelles a été retenue, car elle est censée nous fournir une analyse plus fine des processus à l'œuvre sur les parcelles.

ii. Paysages

Sur le territoire de Féney, nos analyses ne montrent pas de corrélation significative entre indice de pollinisation réalisée et milieux semi-naturels (proximité et densité). Toutefois, visuellement, la proximité des milieux semi-naturels semble une composante à ne pas négliger dans le gradient Nord-Ouest/Sud-Est observé sur l'approche via les fenêtres glissantes (Figure 11). La proximité entre espaces agricoles et milieux semi-naturels ressort dans de nombreuses études comme ayant une forte importance sur l'abondance et la diversité de pollinisateurs retrouvés dans les milieux agricoles à proximité (Chateil et al. 2016). De manière plus systématique, la synthèse de Ricketts et al. 2008 révèle que la richesse en pollinisateurs et le taux de visite des cultures présentent des déclin exponentiels généraux et significatifs avec l'augmentation de la distance par rapport à l'habitat naturel. De très nombreuses manières de décrire le paysage existent. Dans ce stage de six mois, l'ensemble des variables permettant de décrire un paysage agricole n'ont pas pu être explorées. Notre territoire étant à la frontière entre des parcelles agricoles, zones bâties et milieux semi-naturels, la combinaison des zones bâties et milieux semi-naturels aurait pu être étudiée.

L'indice InVEST a un fort lien avec les milieux naturels dans l'approche même adopté dans le calcul. Les milieux naturels ressortent comme refuge de nidification tandis que l'intensification des pratiques agricoles constitue un appauvrissement des nids pour les abeilles sauvages dans les parcelles agricoles. Ainsi, ces milieux apparaissent comme très favorables aux pollinisateurs dans le calcul du potentiel de pollinisation et impacte les parcelles se trouvant à proximité.

iii. Variations temporelles et variables météorologiques

Nos résultats montrent que les variations interannuelles de l'indice sont fortement corrélées avec les variables météorologiques (température minimale, moyenne, maximale, évapotranspiration, déficit hydrique) du mois de juillet. Pour la grande majorité des plantes cultivées sur le territoire du Fénay, le mois de juillet se situe à la fin de leur cycle et n'a donc qu'un impact minime sur leur rendement. Or le calcul du service de pollinisation réalisée se base sur ces mêmes rendements. Ainsi il semblerait que ce phénomène observé relève plutôt de l'aléatoire sur notre jeu de 14 données (14 années de suivi) que d'une corrélation se basant sur des fondements biologiques. En effet, le colza est la principale culture dépendante des pollinisateurs présente sur le site et sa période de floraison s'étend de mars à avril. Le tournesol quant à lui est beaucoup moins présent sur la zone de Fénay mais sa période de floraison de juillet à août nous incite à poursuivre une analyse plus fine sur cette plante particulièrement dans un futur proche.

c. La résolution spatiale, contrainte par les données disponibles

Le jeu de données à notre disposition est remarquable grâce aux informations précises qu'il fournit et qu'il permet d'obtenir à l'échelle de la parcelle agricole. Hormis quelques rares zones d'études en France, obtenir un rendement à la parcelle est très compliqué à cause de la mise en commun des récoltes des différentes parcelles d'une même exploitation. Malgré tout, ce jeu de données précis et relativement complet présente des limites : il n'y a pas assez de données disponibles pour calculer l'indice à l'échelle de toutes les micro-parcelles, alors que c'est peut-être à cette résolution spatiale qu'on observe le mieux les effets des pratiques. Le nombre de micro-parcelles sur lesquelles nous avons pu travailler est limité par manque de données ou bien également aussi parfois à cause d'un manque de rotation culturales. Nous avons besoin d'au minimum deux cultures dont le rendement dépend des pollinisateurs et de deux autres dont le rendement n'en dépend pas. Dans le jeu de données, des successions de cultures non dépendantes aux pollinisateurs peuvent être observée sur certaines parcelles, ce qui peut empêcher le calcul de l'indicateur de pollinisation réalisée. Une poursuite du suivi dans le temps nous permettrait d'obtenir un jeu de données plus conséquent et de combler les différents trous qui existent pour le moment.

2. Deux indicateurs cohérents mais montrant tout de même des différences

a. Corrélation positive entre les deux indicateurs

En prenant un découpage via des fenêtres glissantes pour le calcul du service de pollinisation réalisée, les deux indices du service de pollinisation sont significativement corrélés. Deux indices se basant sur des informations totalement différentes produisent une information cohérente, ce qui suggère qu'un service commun est mesuré, au moins en partie, par chacun des indices. La pollinisation potentielle, modélisée par une estimation des milieux favorables aux pollinisateurs et le service de pollinisation réalisée, calculé à partir des données de rendement ne sont toutefois pas parfaitement corrélés (Indice de corrélation de Pearson de 0,31). Même si les deux indices convergent vers la modélisation d'un même service, des différences persistent dans la quantification de la pollinisation.

b. Une corrélation entre les indices qui n'est pas parfaite ...

Une corrélation est donc observée entre les deux indices de pollinisation mais elle n'est pas parfaite. Les deux indices se basent sur des jeux de données totalement différents. Pour la modélisation InVEST, la qualification des différents milieux pour la ressource florale et la disponibilité en nids est renseignée par l'utilisateur et est donc une source de biais non négligeable. De plus, cet indice ne prend en compte la présence probable de pollinisateur qu'à partir de données d'occupation du sol, sans tenir compte des pratiques agricoles qui peuvent avoir un impact sur le service de pollinisation (Figure 18). A contrario, l'indice de pollinisation réalisée prend en compte ces impact anthropiques car il se base sur les rendements. Mais cette méthode de calcul d'indice utilise également des simplifications. Nous avons classé chaque espèce cultivée avec une certaine catégorie de dépendance aux pollinisateurs. Or, certaines cultures comme le colza semblent être de moins en moins dépendantes à la pollinisation pour assurer leurs rendements, et une forte variabilité entre variétés existe, ce qui ne nous aide pas à estimer aussi précisément le service de pollinisation que nous le voudrions (Hudewenz et al. 2014).

c. Pertinence des indicateurs pour évaluer le service de pollinisation aux différentes résolutions spatiales

Nos résultats semblent montrer qu'à l'échelle du territoire dans son ensemble, l'indicateur de pollinisation InVEST est très pratique pour estimer les services de pollinisation. Néanmoins, la difficulté à quantifier précisément les différences de ressources florales et de site de nidification entre les milieux peut entraîner un biais sur les estimations fine à l'échelle de la parcelle du service de pollinisation InVEST. La déclinaison du service de pollinisation réalisée à l'échelle des parcelles/micro-parcelles a montré des limites mais est l'indice qui nous permet d'estimer assez précisément le service de pollinisation sur des parcelles agricoles. Cela permet d'établir des corrélations avec les pratiques agricoles sur place décrites ci-dessus.

3. Perspectives de ce travail

A la suite de ce stage, une thèse sera menée pour approfondir l'approche qui a été faite sur le territoire de Féney à d'autres territoires agricoles. En effet, nous avons pu montrer que sur ce territoire dont les informations de rendements sont très bien renseignées à travers le temps et l'espace, deux indices de pollinisation totalement différents étaient bien corrélés. Nous avons donc des conclusions pertinentes pour le territoire d'étude. L'objectif sera donc par la suite de récupérer des données sur divers territoires agricoles dans différentes localisations en France afin de savoir si notre approche est généralisable. Si tel est le cas, l'objectif final serait de pouvoir construire un outil simple d'utilisation à destination des agriculteurs afin de promouvoir la diversité et l'abondance en pollinisateurs dans un but de réduction des divers produits utilisés en agriculture intensive.

Comme cela avait été mentionné en introduction, la mesure du service de pollinisation se fait généralement par des observations directes sur le terrain. Cela permet d'appréhender la diversité et

l'abondance des pollinisateurs directement sur le site d'étude. En couplant l'approche d'analyse de données réalisée durant ce stage avec des observations de terrain, il serait possible d'étudier de possibles liens entre pratiques agricoles et service de pollinisation, ce qui permettrait d'aller plus loin dans la compréhension des mécanismes guidant ces corrélations. Cette approche de terrain devrait coupler relevé de diversité et d'abondance de pollinisateurs et relevé direct de l'efficacité de pollinisation via l'utilisation de pollinomètres et une méthode de suivi bio-acoustique. Le choix des méthodes exactes de suivis est encore à déterminer mais l'objectif final serait d'une part de valider les résultats obtenus par comparaison des indicateurs sur le secteur de Fénay et de l'étendre à d'autres territoires d'études et dans un second temps d'étudier le lien entre pollinisation et pratiques culturales.

Cette étude de terrain pourrait également déboucher sur la mise en place d'un suivi fin des milieux et de leurs interactions avec les pollinisateurs : ressources florales et capacité d'accueil de nid de pollinisateurs pour avoir une idée plus fine de l'indice de pollinisation via la modélisation InVEST. A titre d'exemple, les données CarHab sur le territoire du Parc Naturel Régional du Pilat sont disponibles et il serait intéressant de pouvoir caractériser précisément quelles ressources pour les pollinisateurs offrent les différents milieux caractérisés très précisément dans ce programme.

4. Conseils de gestion à partir des données récoltées

Nos résultats permettent de mettre en lumière les zones du territoire de Fénay où le service de pollinisation est le plus favorable et là où il l'est le moins. Dans l'état actuel des choses, des recommandations peuvent être faites aux agriculteurs. S'ils souhaitent avoir de bons rendements, ils devraient planter en priorité leurs cultures dépendantes aux pollinisateurs dans le quart Nord-Ouest de la zone du Fénay, où le service de pollinisation est le meilleur. Au contraire, le quart sud-Est semble à éviter pour les cultures dépendantes aux pollinisateurs. Cette vision de productivité peut être couplée à une vision de promotion de la biodiversité. En effet, l'action des pollinisateurs sur le rendement des cultures est influencée par leur diversité et leur abondance. Les travaux de Garibaldi et al. 2011, 2013, 2016 démontrent expérimentalement la nécessité de la présence de pollinisateurs pour les rendements de certaines espèces cultivées. Promouvoir la présence de pollinisateurs dans une parcelle peut se faire de diverses manières. Cela peut passer par la diminution de l'utilisation d'insecticides, la mise en jachère d'une partie des terres afin de mettre en place des bandes fleuries et des haies, et la restauration de zones semi-naturelles et naturelles adjacentes aux cultures (Garibaldi et al. 2014). Nos résultats tendent également à montrer que la diminution d'utilisation d'herbicides est une mesure importante à mettre en place pour promouvoir le service de pollinisation. Couplé à cela, une augmentation de la diversité des cultures peut se faire parallèlement. Cette diversité des cultures est elle-même un catalyseur de la production agricole d'autant plus important dans un contexte de changement climatique, qui pourrait se traduire par des précipitations insuffisantes (Donfouet et al. 2017). En théorie, de tels changements augmenteront l'hétérogénéité des terres agricoles, favorisant les services de pollinisation et donc la productivité et la durabilité de l'agriculture (Garibaldi et al. 2014).

Parfois, les écosystèmes agricoles sont considérés très simplement d'un point de vue très anthropique avec comme seul pollinisateur considéré : l'abeille sauvage. Des systèmes ne prenant en compte qu'une gestion mono-spécifique de pollinisateurs comme cela peut être le cas avec les abeilles domestiques ne

sont pas viables pour les systèmes agricoles (Vasiliev et al. 2020). En effet cette gestion mono-spécifique des pollinisateurs ne remplace pas la contribution de riches assemblages de pollinisateurs sauvages et comporte des risques associés à l'incidence des agents pathogènes, des maladies et des prédateurs (Garibaldi et al. 2014).

Dans un cadre général, mettre en place des paysages agricoles promouvant les services écosystémiques pour conserver une bonne productivité agricole tout en réduisant les produits agrochimiques semble essentiel dans la période de crise actuelle. L'intensification écologique qui s'oppose à l'intensification agricole, promeut ce genre de pratiques et montre qu'il n'y a pas de diminution de rendements avec une conversion d'une partie des cultures en habitats favorables aux auxiliaires de cultures (Pywell et al. 2015). Promouvoir l'intensification écologique auprès des agriculteurs grâce à de la vulgarisation scientifique pour démontrer les applications et transmettre la valeur économique des services de pollinisation augmenterait probablement l'adoption des pratiques bénéfiques. Au-delà de ce stage, la thèse aura pour but de promouvoir ce genre de lien fort entre recherche scientifique et acteurs de terrain. Il reste encore des lacunes dans la compréhension fine de l'ensemble de comment l'intensification écologique peut garantir les rendements agricoles, augmenter la rentabilité au niveau de la production et de la consommation, augmenter la rentabilité à l'échelle de l'exploitation, ou quelles pratiques sont les plus efficaces pour atteindre ces objectifs. En effet, au-delà de la pollinisation d'autres services bénéficient de la mise en place d'intensification agricoles comme le biocontrôle des ravageurs de cultures. Dans la thèse qui suivra, l'interaction entre service de pollinisation et biocontrôle des ravageurs du colza sera également étudiée (Gardarin et al. 2022)

Conclusion

Nos résultats suggèrent que les deux indicateurs conçus pour une grande étendue spatiale s'adaptent à l'échelle de territoires. Une variabilité des indicateurs est observée sur le territoire de Fénay et différentes résolutions ont été adoptées pour analyser les variations spatiales de l'indice de pollinisation réalisée. Chaque résolution montre des variations différentes. Avec la résolution la plus large (les fenêtres glissantes) une corrélation entre indices de pollinisation réalisée et potentielle a été démontrée. Même si elle n'est pas parfaite, un même service semble être mesuré par les deux indices testés. Nous avons également étudié les relations entre variations spatiales de l'indice de pollinisation réalisée, les données paysagères et les pratiques agricoles. Aucune corrélation avec la distance ou la densité à l'élément semi-naturel le plus proche n'a été trouvée. Avec la résolution spatiale la plus fine, les micro-parcelles, une relation négative entre indice de pollinisation et utilisation d'herbicide est significativement ressortie. Ainsi, il semblerait que sur des paysages de grandes cultures, les pratiques culturales ont un impact non négligeable sur les pollinisateurs.

Références

- Aguilera, Guillermo, Tomas Roslin, Kirsten Miller, Giovanni Tamburini, Klaus Birkhofer, Berta Caballero-Lopez, Sandra Ann-Marie Lindström, et al. 2020. « Crop Diversity Benefits Carabid and Pollinator Communities in Landscapes with Semi-natural Habitats ». Édité par Marney Isaac. *Journal of Applied Ecology* 57 (11): 2170-79. <https://doi.org/10.1111/1365-2664.13712>.
- Aizen, Marcelo A. Sebastián Aguiar, Jacobus C. Biesmeijer, Lucas A. Garibaldi, David W. Inouye, Chuleui Jung, Dino J. Martins, et al. 2019. « Global Agricultural Productivity Is Threatened by Increasing Pollinator Dependence without a Parallel Increase in Crop Diversification ». *Global Change Biology* 25 (10): 3516-27. <https://doi.org/10.1111/gcb.14736>.
- Balfour, Nicholas J., et Francis L. W. Ratnieks. 2022. « The Disproportionate Value of ‘Weeds’ to Pollinators and Biodiversity ». *Journal of Applied Ecology* 59 (5): 1209-18. <https://doi.org/10.1111/1365-2664.14132>.
- Bartholomé, Océane, et Sandra Lavorel. 2019. « Disentangling the Diversity of Definitions for the Pollination Ecosystem Service and Associated Estimation Methods ». *Ecological Indicators* 107 (décembre): 105576. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2019.105576>.
- Ben-Ari, Tamara, Julien Boé, Philippe Ciais, Remi Lecerf, Marijn Van der Velde, et David Makowski. 2018. « Causes and Implications of the Unforeseen 2016 Extreme Yield Loss in the Breadbasket of France ». *Nature Communications* 9 (1): 1627. <https://doi.org/10.1038/s41467-018-04087-x>.
- Besancenot, Jean-Pierre, Havard, Sabrina, Cassagne, Étienne, « L'été meurtrier de 2003 en Bourgogne », *Revue Géographique de l'Est* [En ligne], vol. 46 / 1-2 | 2006, mis en ligne le 18 décembre 2009, consulté le 18 août 2022. URL : <http://journals.openedition.org/rge/1350> ; DOI : <https://doi.org/10.4000/rge.1350>
- Biesmeijer, J. C. S. P. M. Roberts, M. Reemer, R. Ohlemüller, M. Edwards, T. Peeters, A. P. Schaffers, et al. 2006. « Parallel Declines in Pollinators and Insect-Pollinated Plants in Britain and the Netherlands ». *Science* 313 (5785): 351-54. <https://doi.org/10.1126/science.1127863>.
- Bohnenblust, Eric W., Anthony D. Vaudo, J. Franklin Egan, David A. Mortensen, et John F. Tooker. 2016. « Effects of the Herbicide Dicamba on Nontarget Plants and Pollinator Visitation: Dicamba and Pollinator Visitation ». *Environmental Toxicology and Chemistry* 35 (1): 144-51. <https://doi.org/10.1002/etc.3169>.
- Chambres d'agriculture Bourgogne-Franche-Comté, Guide Cultures Partie 2 : Raisonner ses interventions de printemps, 2021. URL : <https://fr.calameo.com/read/00275707927fc16f98898>
- Chambres d'agriculture Bourgogne-Franche-Comté, Guide Variétés Aide au choix des variétés pour les implantations d'automne, 2021. URL : https://bourgognefranche.comte.chambres-agriculture.fr/fileadmin/user_upload/National/FAL_commun/publications/Bourgogne-Franche-Comte/CRABFC/Agronomie_FV/2021-GuideVarietes_VF_01.pdf
- Ceballos, Gerardo, Paul R. Ehrlich, et Rodolfo Dirzo. 2017. « Biological Annihilation via the Ongoing Sixth Mass Extinction Signaled by Vertebrate Population Losses and Declines ». *Proceedings of the National Academy of Sciences* 114 (30). <https://doi.org/10.1073/pnas.1704949114>.
- Chateil, Carole, et Emmanuelle Porcher. 2015. « Landscape Features Are a Better Correlate of Wild Plant Pollination than Agricultural Practices in an Intensive Cropping System ». *Agriculture, Ecosystems & Environment* 201 (mars): 51-57. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2014.12.008>

- Cheptou, Pierre-Olivier. 2021. « Pollination strategies in the face of pollinator decline ». *Botany Letters* 168 (3): 316-23. <https://doi.org/10.1080/23818107.2021.1884900>.
- Chauvin, Hortense, Michels Clémence. 2022. Débat Macron-Lepen, un « vide abyssal » sur l'écologie. *Reporterre*. <https://reporterre.net/Debat-Macron-Le-Pen-un-vide-abyssal-sur-l-ecologie>
- Cowie, Robert H. Philippe Bouchet, et Benoît Fontaine. 2022. « The Sixth Mass Extinction: Fact, Fiction or Speculation? » *Biological Reviews* 97 (2): 640-63. <https://doi.org/10.1111/brv.12816>.
- Desaegher, James, Annie Ouin, et David Sheeren. 2022. « How Far Is Enough? Prediction of the Scale of Effect for Wild Bees ». *Ecography* 2022 (5). <https://doi.org/10.1111/ecog.05758>.
- Donfouet, Hermann Pythagore Pierre, Aleksandra Barczak, Cécile Détang-Dessendre, et Elise Maigné. 2017. « Crop Production and Crop Diversity in France: A Spatial Analysis ». *Ecological Economics* 134 (avril): 29-39. <https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2016.11.016>.
- Duchenne F, Porcher E, Mihoub J-B, Loïs G, Fontaine C (2022) Controversy over the decline of arthropods: a matter of temporal baseline? bioRxiv, 2022.02.09.479422, ver. 3 peerreviewed and recommended by Peer Community in Ecology. <https://doi.org/10.1101/2022.02.09.479422>
- Fontaine, Colin, Isabelle Dajoz, Jacques Meriguet, et Michel Loreau. 2005. « Functional Diversity of Plant–Pollinator Interaction Webs Enhances the Persistence of Plant Communities ». Édité par Nick Waser. *PLoS Biology* 4 (1): e1. <https://doi.org/10.1371/journal.pbio.0040001>.
- Gabriel, Doreen, et Teja Tschardt. 2007. « Insect Pollinated Plants Benefit from Organic Farming ». *Agriculture, Ecosystems & Environment* 118 (1-4): 43-48. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2006.04.005>.
- Gallai, Nicola, Jean-Michel Salles, Josef Settele, et Bernard E. Vaissière. 2009. « Economic Valuation of the Vulnerability of World Agriculture Confronted with Pollinator Decline ». *Ecological Economics* 68 (3): 810-21. <https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2008.06.014>.
- Gardarin, Antoine, Dominique Le Floch, Justine Pigot, et Muriel Valantin-Morison. 2022. « Impact des bandes fleuries sur la regulation des bioagresseurs », 7.
- Garibaldi, Lucas A. Ingolf Steffan-Dewenter, Claire Kremen, Juan M. Morales, Riccardo Bommarco, Saul A. Cunningham, Luísa G. Carvalheiro, et al. 2011. « Stability of Pollination Services Decreases with Isolation from Natural Areas despite Honey Bee Visits: Habitat Isolation and Pollination Stability ». *Ecology Letters* 14 (10): 1062-72. <https://doi.org/10.1111/j.1461-0248.2011.01669.x>.
- Garibaldi, Lucas A, Luísa G Carvalheiro, Sara D Leonhardt, Marcelo A Aizen, Brett R Blaauw, Rufus Isaacs, Michael Kuhlmann, et al. 2014. « From Research to Action: Enhancing Crop Yield through Wild Pollinators ». *Frontiers in Ecology and the Environment* 12 (8): 439-47. <https://doi.org/10.1890/130330>.
- Goulson, Dave. 2019. « The Insect Apocalypse, and Why It Matters ». *Current Biology* 29 (19): R967-71. <https://doi.org/10.1016/j.cub.2019.06.069>.
- Goulson, Dave. 2014. « Pesticides Linked to Bird Declines ». *Nature* 511 (7509): 295-96. <https://doi.org/10.1038/nature13642>.
- Greenleaf, Sarah S. Neal M. Williams, Rachael Winfree, et Claire Kremen. 2007. « Bee Foraging Ranges and Their Relationship to Body Size ». *Oecologia* 153 (3): 589-96. <https://doi.org/10.1007/s00442-007-0752-9>.

- Hallett, Allysa C. Randall J. Mitchell, Evan R. Chamberlain, et Jeffrey D. Karron. 2017. « Pollination Success Following Loss of a Frequent Pollinator: The Role of Compensatory Visitation by Other Effective Pollinators ». *AoB PLANTS* 9 (3). <https://doi.org/10.1093/aobpla/plx020>.
- Hallmann, Caspar A. Martin Sorg, Eelke Jongejans, Henk Siepel, Nick Hofland, Heinz Schwan, Werner Stenmans, et al. 2017. « More than 75 Percent Decline over 27 Years in Total Flying Insect Biomass in Protected Areas ». Édité par Eric Gordon Lamb. *PLOS ONE* 12 (10): e0185809. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0185809>.
- Hudewenz, A. G. Pufal, A-L. Bögeholz, et A-M. Klein. 2014. « Cross-Pollination Benefits Differ among Oilseed Rape Varieties ». *The Journal of Agricultural Science* 152 (5): 770-78. <https://doi.org/10.1017/S0021859613000440>.
- IPBES (2016). The assessment report of the Intergovernmental Science-Policy Platform on Biodiversity and Ecosystem Services on pollinators, pollination and food production. S.G. Potts, V. L. Imperatriz-Fonseca, and H. T. Ngo (eds). Secretariat of the Intergovernmental Science-Policy Platform on Biodiversity and Ecosystem Services, Bonn, Germany. 552 pages. <https://doi.org/10.5281/zenodo.3402856>
- Jakobsson, Anna, et Jon Ågren. 2014. « Distance to Semi-Natural Grassland Influences Seed Production of Insect-Pollinated Herbs ». *Oecologia* 175 (1): 199-208. <https://doi.org/10.1007/s00442-014-2904-z>.
- Kehoe, Rachel, Enric Frago, et Dirk Sanders. 2021. « Cascading Extinctions as a Hidden Driver of Insect Decline ». *Ecological Entomology* 46 (4): 743-56. <https://doi.org/10.1111/een.12985>.
- Klein, Alexandra-Maria, Bernard E Vaissière, James H Cane, Ingolf Steffan-Dewenter, Saul A Cunningham, Claire Kremen, et Teja Tscharntke. 2007. « Importance of Pollinators in Changing Landscapes for World Crops ». *Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences* 274 (1608): 303-13. <https://doi.org/10.1098/rspb.2006.3721>.
- Kremen, Claire, Neal M. Williams, Marcelo A. Aizen, Barbara Gemmill-Herren, Gretchen LeBuhn, Robert Minckley, Laurence Packer, et al. 2007. « Pollination and Other Ecosystem Services Produced by Mobile Organisms: A Conceptual Framework for the Effects of Land-Use Change ». *Ecology Letters* 10 (4): 299-314. <https://doi.org/10.1111/j.1461-0248.2007.01018.x>.
- Kühnel, Sara, et Nico Blüthgen. 2015. « High Diversity Stabilizes the Thermal Resilience of Pollinator Communities in Intensively Managed Grasslands ». *Nature Communications* 6 (1): 7989. <https://doi.org/10.1038/ncomms8989>.
- Lanner, Julia, Nicolas Dubos, Benoît Geslin, Boris Leroy, Carlos Hernández-Castellano, Jovana Bila Dubaić, Laura Bortolotti, et al. 2022. « On the road: Anthropogenic factors drive the invasion risk of a wild solitary bee species ». *Science of The Total Environment* 827 (mars): 154246. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.154246>.
- Leather, S.R. 2018. « “Ecological Armageddon” - More Evidence for the Drastic Decline in Insect Numbers: Insect Declines ». *Annals of Applied Biology* 172 (1): 1-3. <https://doi.org/10.1111/aab.12410>.
- LeBuhn, Gretchen, et Joshua Vargas Luna. 2021. « Pollinator Decline: What Do We Know about the Drivers of Solitary Bee Declines? » *Current Opinion in Insect Science* 46 (août): 106-11. <https://doi.org/10.1016/j.cois.2021.05.004>.
- Leandro, Camila, et Pierre Jay-Robert. 2019. « Perceptions and Representations of Animal Diversity: Where Did the Insects Go? » *Biological Conservation* 237 (septembre): 400-408. <https://doi.org/10.1016/j.biocon.2019.07.031>.
- Leonhardt Sara Diana, Nicola Gallai, Lucas Alejandro Garibaldi, Michael Kuhlmann, et Alexandra-Maria Klein. 2013. « Economic Gain, Stability of Pollination and Bee Diversity Decrease from Southern to Northern Europe ». *Basic and Applied Ecology* 14 (6): 461-71. <https://doi.org/10.1016/j.baee.2013.06.003>.
- Lewis, Simon L. et Mark A. Maslin. 2015. « Defining the Anthropocene ». *Nature* 519 (7542): 171-80. <https://doi.org/10.1038/nature14258>.

- Martel, Gilles, Stéphanie Aviron, Alexandre Joannon, Etienne Lalechère, Bénédicte Roche, et Hugues Boussard. 2019. « Impact of Farming Systems on Agricultural Landscapes and Biodiversity: From Plot to Farm and Landscape Scales ». *European Journal of Agronomy* 107 (juillet): 53-62. <https://doi.org/10.1016/j.eja.2017.07.014>.
- Martin, Gabrielle, Colin Fontaine, Francesco Accatino, et Emmanuelle Porcher. 2019. « New Indices for Rapid Assessment of Pollination Services Based on Crop Yield Data: France as a Case Study ». *Ecological Indicators* 101 (juin): 355-63. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2019.01.022>.
- Martin, Gabrielle, Vincent Devictor, Eric Motard, Nathalie Machon, et Emmanuelle Porcher. 2019. « Short-Term Climate-Induced Change in French Plant Communities ». *Biology Letters* 15 (7): 20190280. <https://doi.org/10.1098/rsbl.2019.0280>.
- Mace, Georgina M, et Hugh P Possingham. s. d. « Prioritizing Choices in Conservation », 18.
- Nilsson, Sven G. Markus Franzén, et Emma Jönsson. 2008. « Long-Term Land-Use Changes and Extinction of Specialised Butterflies ». *Insect Conservation and Diversity*, septembre. <https://doi.org/10.1111/j.1752-4598.2008.00027.x>.
- Philpott, Stacy M., Brenda B. Lin, Shalene Jha, et Shannon J. Brines. 2008. « A Multi-Scale Assessment of Hurricane Impacts on Agricultural Landscapes Based on Land Use and Topographic Features ». *Agriculture, Ecosystems & Environment* 128 (1-2): 12-20. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2008.04.016>.
- Pimm, S. L. C. N. Jenkins, R. Abell, T. M. Brooks, J. L. Gittleman, L. N. Joppa, P. H. Raven, C. M. Roberts, et J. O. Sexton. 2014. « The Biodiversity of Species and Their Rates of Extinction, Distribution, and Protection ». *Science* 344 (6187): 1246752. <https://doi.org/10.1126/science.1246752>.
- Pisa, L. W. V. Amaral-Rogers, L. P. Belzunces, J. M. Bonmatin, C. A. Downs, D. Goulson, D. P. Kreutzweiser, et al. 2015. « Effects of Neonicotinoids and Fipronil on Non-Target Invertebrates ». *Environmental Science and Pollution Research* 22 (1): 68-102. <https://doi.org/10.1007/s11356-014-3471-x>.
- Potts, Simon G. Jacobus C. Biesmeijer, Claire Kremen, Peter Neumann, Oliver Schweiger, et William E. Kunin. 2010. « Global pollinator declines: trends, impacts and drivers ». *Trends in Ecology & Evolution* 25 (6): 345-53. <https://doi.org/10.1016/j.tree.2010.01.007>.
- Potts, Simon G. Vera Imperatriz-Fonseca, Hien T. Ngo, Marcelo A. Aizen, Jacobus C. Biesmeijer, Thomas D. Breeze, Lynn V. Dicks, et al. 2016. « Safeguarding Pollinators and Their Values to Human Well-Being ». *Nature* 540 (7632): 220-29. <https://doi.org/10.1038/nature20588>.
- Pywell, Richard F., Matthew S. Heard, Ben A. Woodcock, Shelley Hinsley, Lucy Ridding, Marek Nowakowski, et James M. Bullock. 2015. « Wildlife-Friendly Farming Increases Crop Yield: Evidence for Ecological Intensification ». *Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences* 282 (1816): 20151740. <https://doi.org/10.1098/rspb.2015.1740>.
- Raven, Peter H. et David L. Wagner. 2021. « Agricultural Intensification and Climate Change Are Rapidly Decreasing Insect Biodiversity ». *Proceedings of the National Academy of Sciences* 118 (2): e2002548117. <https://doi.org/10.1073/pnas.2002548117>.
- Ricketts, Taylor H., James Regetz, Ingolf Steffan-Dewenter, Saul A. Cunningham, Claire Kremen, Anne Bogdanski, Barbara Gemmill-Herren, et al. 2008. « Landscape Effects on Crop Pollination Services: Are There General Patterns? ». *Ecology Letters* 11 (5): 499-515. <https://doi.org/10.1111/j.1461-0248.2008.01157.x>.
- Schär, Christoph, Pier Luigi Vidale, Daniel Lüthi, Christoph Frei, Christian Häberli, Mark A. Liniger, et Christof Appenzeller. 2004. « The Role of Increasing Temperature Variability in European Summer Heatwaves ». *Nature* 427 (6972): 332-36. <https://doi.org/10.1038/nature02300>.

- Sharp, R. Tallis, H. T. Ricketts, T. Guerry, A. D. Wood, S. A. Chaplin-Kramer, R. Nelson, E. Ennaanay, D. Wolny, S. Olwero, N. Vigerstol, K. Pennington, D. Mendoza, G. Aukema, J. Foster, J. Forrest, J. Cameron, D. Arkema, K. Lonsdorf, E. ... Douglass, J. (2018). InVEST 3.6.0 User's Guide. The Natural Capital Project, Stanford University, University of Minnesota, The Nature Conservancy, and World Wildlife Fund, pp. 62–72.
- Sánchez-Bayo, Francisco, et Kris A.G. Wyckhuys. 2019. « Worldwide Decline of the Entomofauna: A Review of Its Drivers ». *Biological Conservation* 232 (avril): 8-27. <https://doi.org/10.1016/j.biocon.2019.01.020>.
- Stephens, Andrea E.A. 2021. « Insects in the Age of Extinction ». *Cell* 184 (6): 1395-97. <https://doi.org/10.1016/j.cell.2021.02.043>.
- Sluijs, Jeroen P van der. 2020. « Insect Decline, an Emerging Global Environmental Risk ». *Current Opinion in Environmental Sustainability* 46 (octobre): 39-42. <https://doi.org/10.1016/j.cosust.2020.08.012>.
- Tinsley-Marshall, Paul, Alana Skilbeck, et Alison Riggs. 2021. « Conservation Evidence Bugs Matter Citizen Science Survey Demonstrates Temporal Difference in Invertebrate Abundance in Kent and South East England », 10.
- Vanbergen, Adam J, et the Insect Pollinators Initiative. 2013. « Threats to an Ecosystem Service: Pressures on Pollinators ». *Frontiers in Ecology and the Environment* 11 (5): 251-59. <https://doi.org/10.1890/120126>.
- Vasiliev, Denis, et Sarah Greenwood. 2020. « Pollinator Biodiversity and Crop Pollination in Temperate Ecosystems, Implications for National Pollinator Conservation Strategies: Mini Review ». *Science of The Total Environment* 744 (novembre): 140880. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.140880>.
- Woodcock, Thomas S. Laura J. Pekkola, Cara Dawson, Fawziah L. Gadallah, et Peter G. Kevan. 2014. « Development of a Pollination Service Measurement (PSM) Method Using Potted Plant Phytometry ». *Environmental Monitoring and Assessment* 186 (8): 5041-57. <https://doi.org/10.1007/s10661-014-3758-x>.
- Yvoz, Séverin. (2021). Analyse multi-échelles des compromis entre services écosystémiques fournis par la flore adventice.
- Zulian, Grazia, Joachim Maes, et Maria Paracchini. 2013. « Linking Land Cover Data and Crop Yields for Mapping and Assessment of Pollination Services in Europe ». *Land* 2 (3): 472-92. <https://doi.org/10.3390/land2030472>.

Annexes :

Annexe 1 : Liste des différents milieux renseignés pour la carte d'occupation des sols

Ail	Aubergine	Autre	Autres ornementales	Avoine	Avoine hiver
Bandes enherbées	Betterave Essais	Betterave rouge	Betterave sucrière	Blé pépinière	Blé tendre hiver
Blé tendre printemps	Carotte	Carotte grosse	Cassis	Céleri	Chia
Choux	Colza	Colza hiver	Colza hiver industriel	Concombre	Courgette

Echalote	Epeautre	Escourgeon	Fèverole hiver	Flageolets	Fourrage 1
Fraise	Haricots	Haricots verts	Jachère en graminées	Jachère légumes et graminées	Jachère non semée
Jachère mellifère	Légumes mélange	Lentille	Lin	Lin oléagineux	Luzerne
Maïs	Maïs ensilage	Maïs grain	Mauve	Mélange Pollinique	Mélisse
Miscanthus	Moutarde	Moutarde brune	Moutarde hiver	Moutarde printemps	Navet
Œillette	Oignon	Oignon repiq printemps	Oignon semis printemps	Orge hiver	Orge printemps
PdT consom	PdT plant	PdT primeur	Persil	Poireau	Pois
Pois prot. hiver	Pois prot. printemps	Poivron-Piment	Pomme de terre	Potiron	Salade
Soja	Tomate	Tournesol	Triticale	Vesce commune	Forêt de feuillus
Forêt de conifères	Friches	Urbain dense	Urbain diffus	Pelouses	Eau
Zone Industrielle	Routes	Landes			

Annexe 2 :

Tableau des ressources florales et disponibilités en nid des différents milieux pour InVEST

Excel fourni