

# Projet post-doctorat: Gestion spatiale durable des paysages agricoles : une application des « métacommunautés » au débat land-sharing vs land-sparing

## Contexte :

Le rôle de l'homme dans les changements environnementaux actuels n'est plus à démontrer<sup>1</sup>. Si certains de ces changements concernent de très grandes échelles (eg, le changement climatique), nombre d'activités humaines créent de facto une hétérogénéité spatiale qui contraint la survie, la dispersion et la diversité des espèces présentes. Cette hétérogénéité est pleinement perceptible dans un cadre agricole. L'agriculture intensive crée par exemple des zones très particulières (monocultures, environnements marqués (fertilisation, pesticides)), tandis que les approches « bio » et agro-écologiques limitent ce contraste, en incorporant une approche diversifiée et un recours moins important aux intrants. Dans un monde très peuplé et étant donné la crise actuelle de la biodiversité, il est crucial que l'espace modelé concilie les objectifs écologiques (eg, le maintien de réseaux écologiques intègres) et le rendement. Pour un même objectif de production, intensifier l'agriculture sur une surface restreinte permettrait de garder de larges surfaces à l'état sauvage (land sparing, très hétérogène) tandis qu'une approche à plus faible rendement aurait moins d'impact immédiat, mais concernerait une surface plus importante (land sharing, moins hétérogène)<sup>2</sup>. Le débat sur les avantages relatifs de ces deux solutions reste crucial pour le devenir de l'agriculture<sup>2-4</sup>.

Ce contraste entre les deux hétérogénéités spatiales est susceptible d'affecter durablement les communautés naturelles, sur les plans écologique et évolutif. Ces effets peuvent être envisagés sous l'angle de métacommunautés. Une métacommunauté est un ensemble de communautés, dans différentes localités (eg, patch exploités ou non exploités par l'agriculture), liées entre elles par la dispersion des espèces qui les constituent<sup>5</sup>. La diversité au sein de la métacommunauté est alors l'équilibre entre différents processus: l'assortiment local des espèces selon les environnements locaux (« species sorting ») et les effets de dispersion entre patchs (« mass effects »)<sup>5,6</sup>. Dans un contexte de forte hétérogénéité (eg, land sparing), les contraintes environnementales très différentes dominent la dynamique (species sorting), mais une hétérogénéité spatiale moindre pourrait permettre la dispersion effective des différentes espèces (mass effects). L'hétérogénéité peut de même contraindre les dynamiques évolutives au sein de ces espaces agricoles<sup>3</sup>. Les espaces très contrastés favorisent une forte sélection locale (eg, l'évolution rapide face aux pesticides) quand des espaces plus homogènes peuvent mener à la propagation efficace de flux de gènes.

## Objectif scientifique :

L'objectif du projet de postdoctorat ici présenté est de s'appuyer sur le développement de modèles « métacommunauté », pour mieux comprendre les effets d'une gestion « land sharing » ou « land sparing », tant du point de vue écologique qu'évolutif. Pour cela, nous souhaitons étendre des travaux récents sur les dynamiques de population se propageant sur des graphes aléatoires<sup>7,8</sup>. Un enjeu ici est de prendre en compte une dynamique écologique complexe, celle des réseaux d'interaction plante-pollinisateur, dans ce cadre de structuration spatiale d'un habitat hétérogène.

## Justification de l'approche scientifique :

La métacommunauté considérée reposera sur deux types de localités (patchs): exploitées vs non exploitées. Trois facteurs décriront l'hétérogénéité spatiale: (1) la proportion de surface exploitée; (2) le degré d'agrégation spatiale (autocorrélation); (3) l'intensité de la différence entre patchs exploités ou non exploités. Ce formalisme permet de retrouver les points de références « land sharing » et « land sparing », mais également d'autres hétérogénéités spatiales. Les dynamiques spatiales seront

envisagées sous forme de dynamique d'occupation basée sur des probabilités de colonisation-extinction. Ce formalisme, classique en métapopulation<sup>9</sup>, peut être aisément adapté au cadre métacommunauté<sup>10,11</sup>. Le projet se développera progressivement, par complexité croissante.

(i) Un modèle de référence simple se concentrera sur deux espèces de pollinisateurs, dont la coexistence sera étudiée selon les contraintes spatiales (1) à (3). Les conditions locales seront non propices dans les zones exploitées (extinction  $e$  forte, colonisation  $c$  réduite) comparées aux zones naturelles. La différence entre les deux types de patchs sera systématiquement manipulée. Une des deux espèces sera supposée plus spécialiste des localités naturelles (ie plus sensible à l'exploitation), ces différences étant reflétées dans les taux de colonisation et d'extinction relatifs. Au sein d'un patch, une compétition pour les ressources florales sera envisagée (ie, colonisation locale moins probable en présence de l'autre espèce). Une fois cette dynamique écologique de base comprise, deux extensions du modèle seront envisagées, sans ordre de priorité particulier:

(ii) Dynamique évolutive. Reprenant le modèle (i), mais considérant l'évolution de certains phénotypes, par processus de mutation/sélection. Nous proposons particulièrement de comprendre comment évolue le choix d'habitat pour les deux espèces et/ou leur dispersion. L'évolution rapide est observée de façon répétée dans le cadre des changements actuels<sup>12</sup>. Une vue optimiste est qu'elle pourrait faciliter le maintien de la diversité<sup>13</sup>. Cependant, cet effet n'est pas garanti. Par exemple, augmenter l'hétérogénéité spatiale peut contre-sélectionner la dispersion, et par là, en réduisant le processus de colonisation, mener à l'extinction (suicide évolutif)<sup>14</sup>.

(iii) Dynamique du réseau plante-pollinisateur. Etendant le modèle (i) à plusieurs espèces, la survie d'une espèce de plante ou de pollinisateur dans chaque patch dépendra du choix d'agriculture vs nature dans le patch, mais aussi de la présence des espèces avec lesquelles elle peut interagir. En écologie, les réseaux d'interaction plante-pollinisateur sont connus comme ayant des structures particulières (emboîtées), supposées donner une certaine robustesse à ceux-ci<sup>15</sup>. Nous varierons le degré d'emboîtement afin de tester cette hypothèse dans un cadre spatial.

D'un point de vue mathématique, le premier modèle (i) sera formalisé par un processus stochastique évoluant sur un graphe aléatoire, généralement considéré en absence d'hétérogénéité de l'habitat<sup>16</sup>. Les nœuds du graphe représentent les patchs, caractérisés par leur type : exploité ou non. Les choix de structure du graphe permettront d'explorer les contraintes (1) à (3). L'espace d'états du processus stochastique étudié précédemment sera ensuite modifié pour inclure l'évolution des traits phénotypiques (modèle (ii)). Enfin, les aspects réseaux écologiques (modèle (iii)) seront envisagés soit en s'appuyant sur des méthodes de systèmes désordonnés, soit en adaptant aux interactions mutualistes des modèles existant actuellement dans un contexte trophique<sup>11</sup>. Dans l'ensemble des modèles (i-iii), l'étude portera non seulement sur le maintien de la diversité, mais également sur des proxys des effets économiques de la gestion envisagée (eg, production agricole, service de pollinisation), afin de déterminer les scénarios permettant la meilleure conciliation.

#### Adéquation à l'appel d'offre :

Le projet de postdoctorat s'appuie sur une collaboration inter-disciplinaire (Ecologie: Nicolas Loeuille (iEES Paris), Mathématiques: Manon Costa (Institut de Mathématiques de Toulouse)). Il porte sur une question importante et actuelle de la transition du monde agricole. Si les modèles proposés donnent une perspective large, les éléments considérés (proportion exploitée, degré d'intensification, autocorrélation du paysage), peuvent être estimés dans le cadre de partenariats. Plusieurs pistes de partenariat sont envisageables. D'abord, les deux chercheurs impliqués ici sont membres de la chaire mathématiques et modélisation de la biodiversité, qui est en fort lien avec plusieurs acteurs du monde économique. Egalement, N. Loeuille, de par ses activités de recherche et d'enseignement, a des contacts auprès de collectivités locales (eg, association « maires pour la planète »), de l'institut de la transition environnementale, et de chercheurs INRAE en lien avec des projets locaux.

<sup>9</sup>Levins et al 1969 *Ann. Ent. Soc. Am.*; <sup>10</sup>Tilman 1994 *Ecology*; <sup>11</sup>Gravel et al. 2011 *Ecol Lett*; <sup>12</sup>Bonnet et al 2022 *Science*; <sup>13</sup>Gomulkiewicz & Holt 1995 *Evolution*; <sup>14</sup>Poethke et al 2011 *Am. Nat.*; <sup>15</sup>Fontaine et al. 2011 *Ecol. Lett.*; <sup>16</sup>Zhang et al 2021 *Ecol. Lett.*