



Formaliser la Durabilité des Paysages Agricoles Comme un Problème Multi-objectif

Francesco Accatino, Alberto Tonda, Muriel Tichit

► To cite this version:

Francesco Accatino, Alberto Tonda, Muriel Tichit. Formaliser la Durabilité des Paysages Agricoles Comme un Problème Multi-objectif. Paysage, biodiversité fonctionnelle et santé des plantes, QUAE; Educagri, 2019, 9782759230136. hal-02482110

HAL Id: hal-02482110

<https://hal.science/hal-02482110v1>

Submitted on 21 Jul 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.

1. Formaliser la durabilité des paysages agricoles comme un problème multi-objectif

Francesco Accatino, Alberto Tonda et Muriel Tichit

Les paysages sont généralement composés d'occupations et usages différents des sols. Pour cette raison, ils offrent de nombreuses fonctions, supports de la fourniture des biens et services écosystémiques. Cette multifonctionnalité est un aspect important de la durabilité qu'il convient d'évaluer et de promouvoir (Moreno-Mateos *et al.*, 2015). De nombreuses actions de gestion du paysage consistent à modifier l'occupation des sols ou encore leur usage. Elles ont des effets directs et indirects sur le niveau de fourniture de biens et services, avec parfois des conséquences inattendues (Bennett *et al.*, 2009). Les actions de gestion maximisant un bien ou un seul service écosystémique conduisent souvent au déclin des autres services, ce qui au final aboutit à une perte de multifonctionnalité du paysage (de Groot *et al.*, 2010).

Les différents services écosystémiques ne sont en effet pas indépendants les uns des autres et sont liés par des compromis (*trade-offs*) ou des synergies. Un compromis correspond à une situation où l'augmentation d'un service est contrebalancée par une diminution d'un autre service. Une synergie correspond à une situation où plusieurs facteurs agissant conjointement créent un effet plus important (positif ou négatif) que la somme des effets attendus s'ils avaient opéré isolément (Rodriguez *et al.*, 2006 ; Bennett *et al.*, 2009). Les compromis peuvent résulter d'un problème d'allocation d'une ressource limitée telle que la terre. Ainsi, l'augmentation d'une occupation des sols fournissant un service écosystémique donné est nécessairement associée à la diminution d'une autre occupation des sols fournissant d'autres services écosystémiques. Par exemple, accroître la surface allouée aux terres arables va augmenter la production végétale mais va conduire à une diminution des surfaces de prairies, qui se traduira par une baisse de stockage du carbone. Comprendre et visualiser les compromis et les synergies entre services écosystémiques est extrêmement important pour gérer et aménager les paysages agricoles.

Afin de promouvoir la multifonctionnalité des paysages agricoles et donc leur durabilité, il est essentiel de prendre en compte les effets des décisions de gestion sur plusieurs services écosystémiques. En d'autres termes, la durabilité d'un paysage agricole est un problème multi-objectif, dans lequel il n'y a pas un seul objectif à maximiser mais plusieurs à prendre en compte et promouvoir.

Passer d'une optimisation mono-objectif à l'optimisation multi-objectif ouvre des défis méthodologiques. En particulier, il s'agit de dériver non pas une solution optimale¹ unique, mais possiblement de nombreuses solutions optimales. Pour formuler et résoudre un problème d'optimisation multi-objectif, la première étape consiste à construire un modèle pour prédire les objectifs à partir des variables de gestion ; la seconde étape consiste à utiliser le modèle pour générer un ensemble de solutions et sélectionner des critères pour choisir les solutions préférées.

1.1. Modéliser pour prédire la fourniture de services écosystémiques dans un paysage

Un modèle multiservice consiste en une description mathématique des effets du climat, des facteurs économiques et des décisions de gestion sur les différents services écosystémiques. C'est un outil pour prédire les portefeuilles de services écosystémiques (voir par exemple

¹ À noter que pour certains problèmes mono-objectifs, il y a des solutions optimales multiples (de tels problèmes sont dénommés multimodaux).

Nelson *et al.*, 2009) et pour étudier les mécanismes conduisant à des conflits ou des synergies entre différents services (Bennett *et al.*, 2009). La modélisation quantitative constitue aussi un moyen d'apprentissage et elle est de plus en plus utilisée pour éclairer les décideurs (Groot et Rossing, 2011).

Le modèle multiservice est une description mathématique d'un système physique qui transforme des inputs en outputs. Il peut s'appuyer sur des algorithmes complexes, ou prendre la forme très simple d'une équation. Les modèles multiservices diffèrent selon la description du paysage. À large échelle, cette description s'appuie sur les occupations et usages du sol. Par exemple chaque occupation du sol peut fournir un certain niveau de service (Burkhard *et al.*, 2012). À petite échelle, la description du paysage peut représenter des phénomènes plus précis tels que la dynamique de population des pollinisateurs et des bio-agresseurs (Bianchi *et al.*, 2010).

Figure 12.1. Représentation schématique d'un cadre de modélisation pour les services écosystémiques basé sur les fonctions de production.

De nombreux modèles multiservices sont conçus en agrégeant des fonctions de production (fig. 12.1). Chaque fonction de production articule, en entrée, les éléments externes qui influencent le système et, en sortie, les différents services écosystémiques. Pour chaque entité élémentaire (p. ex. parcelle) d'un paysage agricole, les entrées sont divisées en variables de gestion et en variables exogènes. Les variables de gestion sont contrôlables par le décideur et peuvent être modulées pour obtenir un certain niveau de fourniture de services. Il s'agit par exemple des décisions concernant le type de culture, les apports de fertilisants ou pesticides dans une parcelle. Les variables exogènes sont les entrées qui influencent le système mais ne peuvent être contrôlées par le décideur. Il peut s'agir par exemple de variables climatiques (précipitation, température) ou encore de variables économiques (prix de marché).

12.1.1. Comparaison de différentes alternatives

Une fois le modèle formulé, on l'utilise pour simuler les effets de différentes alternatives — c'est-à-dire des combinaisons des valeurs des variables de gestion — sur le niveau de fourniture de services écosystémiques dans le paysage agricole. Il est alors possible de trouver des alternatives qui satisfont au mieux les décideurs et acteurs du paysage. Cependant à ce stade, il y a deux problèmes méthodologiques à surmonter :

- comment évaluer la supériorité ou l'infériorité d'une alternative vis-à-vis d'une autre ?
- combien et quelles alternatives prendre en compte pour la comparaison ?

Dans le contexte d'une optimisation mono-objectif, la solution au problème méthodologique est évidente. En revanche, quand on traite de nombreux objectifs, la réponse n'est pas triviale. Une solution consiste à agréger les différents objectifs, par exemple à l'aide d'une moyenne pondérée. Moyenner tous les objectifs en un objectif unique est très attractif pour les acteurs, néanmoins cette solution soulève de nouveaux problèmes ; l'agrégation suppose en effet la substituabilité entre services écosystémiques (Salvati et Zitti, 2009), ce qui signifie que la perte d'une unité d'un service peut être compensée par le gain sur un autre service. Or cela n'est pas susceptible de contribuer à la multifonctionnalité du paysage agricole, en ce que tous les objectifs sont importants et ne peuvent être remplacés par d'autres. D'autre part, les pondérations sont arbitraires, elles impliquent des jugements subjectifs, avec lesquels tous les acteurs ne seront pas nécessairement d'accord. Pour éviter ces biais, il est alors essentiel de considérer les différents objectifs séparément.

Le critère dit de Pareto permet justement de considérer les différents objectifs séparément. Considérons trois alternatives A, B et C (fig. 12.2 gauche) qui sont mesurées par deux

objectifs, dont les valeurs sont données sur l'axe des abscisses (service écosystémique 1 et 2). Il est possible de conclure sans hésitation que l'alternative C est inférieure aux alternatives A et B, car elle donne systématiquement de moins bons résultats pour les deux services écosystémiques. Nous pouvons affirmer que l'alternative C est « Pareto dominée » par les alternatives A et B, qui sont chacune préférable à C. Lorsqu'il s'agit de comparer A et B, on observe que l'alternative A est supérieure à B pour le service écosystémique 2, alors que l'alternative B est supérieure à A pour le service écosystémique 1. On ne peut donc pas choisir entre A et B sans donner de préférence à l'un des deux services écosystémiques. On peut juste dire que les deux alternatives sont « Pareto indépendantes » ou non dominées. La frontière de Pareto est composée de toutes les alternatives qui conduisent à des solutions pour lesquelles un objectif ne peut être amélioré sans dégrader l'autre objectif (fig.12.2 droite).

Figure 12.2. Le concept de frontière de Pareto pour deux services écosystémiques vus comme des objectifs à maximiser.

Le concept de domination de Pareto fournit une solution au problème méthodologique. La finalité de l'optimisation est alors de trouver les alternatives composant la frontière de Pareto, définies comme l'ensemble des alternatives pour lesquelles il n'est pas possible d'améliorer l'un des deux services sans dégrader l'autre, ou encore l'ensemble de toutes les alternatives qui ne sont pas « Pareto dominées » par des autres alternatives. Le défi est donc d'explorer systématiquement les différentes alternatives pour construire la frontière de Pareto.

Une approche possible consiste à tester seulement certaines alternatives, en choisissant des valeurs pour les variables de gestion. Cependant, en faisant cela, on risque de manquer des alternatives intéressantes, notamment lorsque les alternatives optimales se trouvent entre les alternatives testées. Une autre approche consiste à tester toutes les combinaisons possibles de variables de gestion. Bien que cette solution puisse marcher dans des cas simples, les variables de gestion sont souvent trop nombreuses avec trop de valeurs à tester pour chacune et induisent des temps de calcul inabordables. Les techniques classiques d'optimisation peuvent trouver la frontière de Pareto pour un problème donné, mais leur applicabilité est souvent limitée sur des problèmes complexes où il faudrait des années de calcul pour produire un résultat, quand elles n'échoueraient pas tout simplement.

Les algorithmes évolutionnaires représentent une alternative prometteuse. Ils puisent leur origine dans la théorie néo-darwinienne de la sélection naturelle. Les solutions candidates pour un problème sont dénommées « individus » et sont générées aléatoirement pour être ensuite évaluées au regard de l'objectif. Le résultat de l'évaluation, dénommé « valeur de fitness », est alors utilisé pour sélectionner les individus qui produiront de nouveaux individus, dénommés « descendants », en utilisant des mutations aléatoires et des croisements. Les nouveaux individus sont évalués, l'ensemble des solutions candidates est classé par valeur de fitness et les individus les moins performants sont éliminés. La procédure se poursuit avec une nouvelle itération générant des descendants, et cela jusqu'à ce qu'une condition ultime fixée par l'utilisateur soit atteinte.

Au sein des techniques d'optimisation stochastique, les algorithmes évolutionnaires ont un palmarès important de réussites allant du design d'antenne par la Nasa pour l'exploration spatiale, au cadre Sapiens de Facebook utilisé pour debugger automatiquement les applications Android. Les techniques d'optimisation stochastique ne garantissent pas de trouver l'optimum global mais elles sont capables de trouver des solutions quasi optimales, dénommées optima locaux, pour un temps de calcul raisonnable, et cela même pour des problèmes extrêmement complexes. Ces optima locaux ont été utilisés pour optimiser l'usage du sol en vue de maximiser la fourniture de services écosystémiques (Teillard *et al.*, 2017 ; Accatino *et al.*, 2019) ou pour la protection de la biodiversité. Ils sont été discutés dans des

articles méthodologiques (Groot et Rossing, 2011; Memmah *et al.*, 2015).

La plupart des applications utilisant des algorithmes évolutionnaires appartiennent au domaine de l'optimisation multi-objectif. Elles ciblent des problèmes où des critères multiples doivent être optimisés simultanément et la finalité de l'optimisation est alors de trouver la frontière de Pareto. Une fois calculée, celle-ci fournit des informations sur les meilleurs compromis entre objectifs. L'affichage de la frontière de Pareto offre une visualisation de la complexité pour des décideurs ayant à choisir entre différentes alternatives.

Cette théorie peut être appliquée dans une étude de cas, ici une étude visant l'optimisation multi-objectif des services écosystémiques dans le Massif central. Nous considérons le territoire du Massif central composé de 121 petites régions agricoles (PRA). En suivant l'approche développée par Accatino *et al.* (2019), pour chaque petite région agricole, trois fonctions de production écologiques (EPF en anglais) sont construites afin de prédire, à partir de variables décrivant l'occupation et l'usage des sols, les services suivants : la production animale, la production végétale et le stockage du carbone. Une EPF est un modèle statistique liant les variables d'occupation et d'usage du sol aux services écosystémiques. L'hypothèse sous-jacente à chaque EPF est que chaque unité de sol affectée dans une occupation donnée fournit une certaine quantité d'un service écosystémique. Cette quantité est modulée par les variables d'usage du sol. L'occupation du sol correspond ici à cinq types de surface : surface labourable pour la production de biens alimentaires, surface pour la production de fourrage, surface en prairie temporaire/artificielle, surface en prairie semi-naturelle, et forêt. Les variables d'usage sont l'utilisation de pesticides dans les terres labourables et les surfaces en fourrage.

Nous appliquons un algorithme évolutionnaire pour explorer les conséquences de différentes alternatives, c'est-à-dire de combinaisons de variables de gestion, sur la fourniture des trois services écosystémiques par rapport à la situation actuelle. On construit la frontière de Pareto dont la forme nous renseigne sur le type de compromis entre différents services écosystémiques (fig. 12.3).

Figure 12.3. Frontière de Pareto résultant de l'optimisation de trois services écosystémiques (production de biens animaux, de biens végétaux, séquestration du carbone) au niveau du Massif central (France).

La frontière est projetée sur trois plans (a), (b), (c). Toutes les valeurs sont normalisées entre zéro (valeur assignée au point avec le niveau de fourniture de service le plus faible) et 1 (valeur assignée au point avec le niveau de fourniture de service le plus élevé). Top 5 % des valeurs les plus élevées pour la production de biens animaux (noir) ; top 5 % des valeurs les plus élevées pour la production de biens végétaux (gris moyen) ; top 5 % des valeurs les plus élevées pour la séquestration du carbone (gris clair).

Pour améliorer la visualisation, nous projetons les PRA de la frontière de Pareto sur les trois plans. La figure 12.3a montre une synergie entre production de biens animaux et séquestration du carbone. On observe même des PRA avec des valeurs élevées pour les deux services. Certaines (cinq au total) appartiennent au top 5 % de la séquestration du carbone et au top 5 % de la production de biens animaux. Dans la figure 12.3, les graphiques b et c montrent qu'il y a un arbitrage (*trade-off*) entre la production de biens végétaux et les deux autres services ; la maximisation de la production de biens végétaux minimise la production de biens animaux et la séquestration du carbone et vice-versa. L'analyse de la frontière montre qu'il est possible de trouver des stratégies de gestion qui avantageant à la fois la fourniture de biens animaux et la séquestration du carbone, alors que les stratégies maximisant la production de biens végétaux ont des effets négatifs sur les deux autres services.

1.2. Conclusions

Nous avons montré que les méthodes d'optimisation multi-objectif permettent de rendre

explicites les compromis entre différents biens et services dans les paysages agricoles. Les algorithmes évolutionnaires génèrent des allocations alternatives pour l'occupation/usage du sol de chaque entité élémentaire composant le paysage ; ils révèlent donc un large ensemble de solutions possibles. Mais pour passer à l'aménagement du paysage, il convient d'identifier, parmi les solutions possibles, celles qui sont atteignables étant données les contraintes des décideurs et des acteurs du paysage. Il devient alors prioritaire de partager / mettre en débat l'ensemble des solutions avec les acteurs concernés. Les méthodes basées sur la co-construction des scénarios avec les acteurs sont alors des compléments essentiels pour transformer l'espace des solutions *in silico* en espace de solutions atteignables.