



HAL
open science

Evaluer la résilience, vulnérabilité et robustesse des systèmes agricoles

Manon Dardonville, Christian Bockstaller, Olivier Therond

► To cite this version:

Manon Dardonville, Christian Bockstaller, Olivier Therond. Evaluer la résilience, vulnérabilité et robustesse des systèmes agricoles. Vulnérabilité et Résilience dans le renouvellement des approches du développement et de l'environnement, 2019, Versailles, France. hal-02947657

HAL Id: hal-02947657

<https://hal.inrae.fr/hal-02947657>

Submitted on 24 Sep 2020

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.

Evaluer la résilience, vulnérabilité et robustesse des systèmes agricoles

Manon DARDONVILLE^{1,2}, Christian BOCKSTALLER¹, Olivier THEROND¹

¹LAE, Univ Lorraine, INRA, 68000, Colmar, France

²Agrosolutions, 75782, Paris, France

Partout dans le monde, les systèmes agricoles sont confrontés à une augmentation des perturbations climatiques, économiques et sociales (IPCC, 2013; Wright, 2011). L'objectif de la recherche est d'identifier les systèmes agricoles capables de faire face à des chocs (ex. : crise économique) ou à des perturbations tendanciennes (ex. : augmentation des températures) et de continuer à assurer leurs fonctions essentielles (Tendall et al., 2015). La résilience, la vulnérabilité, la robustesse sont des cadres conceptuels qui ont été développés pour traiter de la capacité à maintenir les performances. Tous visent à caractériser la dynamique d'un système lorsque des perturbations se produisent mais, provenant de différentes communautés disciplinaires, leur opérationnalisation n'est pas encore stabilisée (Urruty et al., 2016). Compte tenu du caractère polysémique de ces concepts (Mumby et al., 2014), nous avons choisi de prendre en compte un large éventail de travaux sans distinction du cadre conceptuel de référence (Vulnérabilité, Résilience, Robustesse, ci-après VRR).

Dans la littérature, on rencontre principalement deux types d'approches pour traiter la question de l'opérationnalisation de l'évaluation du VRR.

Tout d'abord, la VRR peut être considéré comme une "*sum of a range of characteristics*" (i.e. un ensemble de caractéristiques, Douxchamps et al., 2017) définie a priori. D'après les opinions d'experts ou l'analyse bibliographique, ces caractéristiques (propriétés) du système sont considérées comme des déterminants clés de la résilience ou des composantes de la vulnérabilité (Altieri et al., 2015; Biggs et al., 2012; Cabell and Oelofse, 2012; Gillespie-Marthaler et al., 2019; Wiréhn et al., 2015). Par exemple, Cabell and Oelofse (2012) ont examiné 13 propriétés (appelées indicateurs comportementaux) de la résilience des agroécosystèmes. Biggs et al. (2012) ont défini trois propriétés de système et quatre principes de gestion pour promouvoir la résilience des services écosystémiques dans les systèmes socio-écologiques, grâce à un examen approfondi des connaissances des experts et de la littérature. Comme l'indiquent Urruty et al. (2016), cette approche est limitée par la subjectivité du point de vue des experts. Surtout, comme le montrent Dardonville et al. (soumis) et Gil et al. (2017), les preuves empiriques concernant les drivers de la VRR sont encore rares et aucune conclusion générique ne peut être tirée. Outre le débat sur la subjectivité de cette approche et les drivers peu clairs de la VRR, l'opérationnalisation nécessite d'affecter à chaque driver une ou plusieurs évaluations qualitatives ou indicateurs quantitatifs prédéfinis (voir par exemple Quinlan et al. (2016)) qui ne sont pas encore stabilisés (par exemple, les indicateurs de diversité).

La deuxième approche est basée sur l'analyse quantitative de la dynamique d'une ou de plusieurs performances d'un système étudié face à une perturbation (Brzezina et al., 2016; Nelson et al., 2019). Dans cette approche, les fonctions attendues des systèmes agricoles (par exemple la production alimentaire ou un revenu équitable pour les agriculteurs) à maintenir sont caractérisées par des attributs de performance (rendement ou revenu). Des critères mathématiques, comme par exemple le *coefficient de variation* ou le *temps de récupération (recovery)*, sont utilisés pour synthétiser quantitativement la dynamique de l'attribut de performance (Barkaoui et al., 2016; Martin et al., 2017; "*characterize systems' behaviour*"

dans Müller, 2005). L'analyse des relations entre ces critères de VRR et les propriétés et caractéristiques du système permet d'identifier les facteurs explicatifs endogènes ou exogènes de la VRR. Elle donne des indications sur la façon d'être résilient (Coomes et al., 2019; Meuwissen et al., 2019). Cette approche peut être considérée comme fournissant des informations plus objectives sur les caractéristiques ou les facteurs à l'origine du VRR. Toutefois, cette dernière est limitée aux études scientifiques et est fortement limitée par la disponibilité de données d'observation historiques ou de modèles. Une fois que les caractéristiques du système résilient auront été déterminées, elles pourront être utilisées comme indicatrices de la VRR, comme dans la première approche mentionnée ci-dessus (Tendall et al., 2015).

En résumé, dans la première approche, les propriétés qui déterminent le VRR sont données alors que dans la seconde, ce sont les résultats. Alors que la première est largement connue et que les travaux sont diffusés, la seconde est beaucoup moins appliquée par la communauté de recherche VRR en raison de la complexité des méthodes mathématiques impliquées, des données ou des modèles requis. A notre connaissance, il n'existe aucune synthèse de ce type d'étude dans le monde de la recherche agricole. Pour combler cette lacune et aider les chercheurs à s'attaquer à l'évaluation quantitative de la VRR, nous avons examiné la bibliographie actuelle. L'objectif était d'établir une synthèse (i) des méthodes déjà utilisées, (ii) de l'attribut de performance et des critères associés pour décrire la dynamique du système et (iii) des critères utilisés dans quel cadre conceptuel.

Méthode

Nous avons produit une revue systématique en générant une requête sur la base de données Web of Science Core Collection sur les articles en anglais sur les zones tempérées des trente dernières années jusqu'en juillet 2018 (10,635 articles). La requête mentionnait : les trois concepts VRR, le système agricole à tous les niveaux d'organisation et l'approche quantitative.

TS = ((vulnerabilit OR resilien* OR robustness) AND (agri* OR agro* OR crop* OR farm* OR grass* OR pastor*) AND (indicator* OR evaluat* OR quantitativ* OR quantif* OR model* OR simulat* OR decrease OR increase OR assess*))*

Ensuite, nous avons appliqué un tri systématique en identifiant les champs lexicaux hors-sujet avec une analyse de la cooccurrence des termes avec le logiciel VOSviewer (1,434 articles restants). Enfin, nous avons vérifié manuellement le reste grâce au titre et au résumé par deux relecteurs et avons identifié 37 articles. Pour synthétiser les résultats de différents travaux manipulant différents cadres conceptuels, nous avons utilisé le cadre conceptuel générique décrit dans Dardonville et al (soumis) basé sur celui de Carpenter et al. (2001 ; "*resilience of what to what*"). La perturbation (VRR "*to what disturbance*", économique ou écologique) est caractérisée par sa nature, son étendue spatiale et temporelle et sa résolution (VRR "*when and where*"). Chaque système agricole (VRR "*to what agricultural system*") est caractérisé par son niveau d'organisation (de la parcelle au territoire, y compris l'exploitation), son type de production et l'attribut de performance (VRR "*for which performance attribute(s)*", par exemple rendement ou revenu) qu'il est jugé important de maintenir dans le temps. Le comportement de l'attribut de performance est suivi dans le temps et décrit par des critères de dynamique. Enfin, les facteurs explicatifs testés sont explicités (VRR "*due to which explanatory factors*").

Les concepts utilisés par les auteurs de chaque article ont été classés et associés au cadre conceptuel auquel ils faisaient référence. Lorsque plusieurs concepts ont été manipulés par les auteurs, nous avons conservé cette information en nommant conjointement les deux. Les critères dynamiques utilisés pour quantifier le comportement de l'attribut de performance dans le temps sont notés avec précision. Les résultats fournis par chaque étude sur l'effet de la perturbation sur la dynamique du système et l'un des facteurs explicatifs potentiels sur ce dernier effet sont synthétisés dans un cadre analytique. Chaque ligne/individu de ce dernier décrit un résultat concernant une perturbation x système x attribut de performance x critères de dynamique (x facteur explicatif, ou pas si seule la sensibilité du système à la perturbation est testée).

Résultats

Cette synthèse nous permet d'identifier les communautés scientifiques travaillant sur le sujet qui voit une accélération de l'intérêt manifesté depuis 2005. En général, les articles identifiés portent sur l'effet du changement climatique (65% des articles) sur les performances agronomiques (rendement, 72% des articles) et économiques (rendement net économique, 16% des articles) des prairies (35% des articles) et des cultures (40% des articles) aux niveaux parcelle (38% des articles), exploitation (35% des articles) et territoire (27% des articles).

Une grande variété de cadres conceptuels, de méthodes mathématiques et de critères de dynamique sont utilisés. Ci-après, nous décrivons d'abord les principales méthodes mathématiques rencontrées, les attributs de performance étudiés et associés aux critères de dynamique utilisés et, enfin, les critères correspondants selon le concept étudié.

Méthodes de mesure et de caractérisation de la dynamique et d'identification de son (ses) déterminant(s)

Chaque étude passée en revue a presque une méthodologie différente pour traiter de la VRR des systèmes agricoles. La méthodologie peut être distinguée selon les méthodes utilisées pour (i) mesurer la dynamique (source des données), (ii) évaluer la dynamique (critères et méthode mathématique utilisée pour l'évaluer), et (iii) identifier les déterminants de cette dynamique (détermination du ou des facteurs explicatifs).

La mesure de la dynamique est basée soit sur des études expérimentales, soit sur des données d'observation existantes, soit sur des données simulées. 12 études sont fondées sur des expériences de terrain de longue durée (Barkaoui et al., 2016; Hoover et al., 2014; Mäkinen et al., 2015) tandis que 16 études utilisent des bases de données existantes (comme le RICA, Bardaji and Iraizoz (2015) et Reidsma and Ewert (2008)). 9 études utilisent des modèles de simulation utilisant des données historiques observées sur les perturbations (climat, prix...) comme les modèles de prairie (Sabatier et al., 2015), les modèles de système agricole (Martin and Magne, 2015) ou les modèles à agents (Bitterman and Bennett, 2016; Brunner and Grêt-Regamey, 2016).

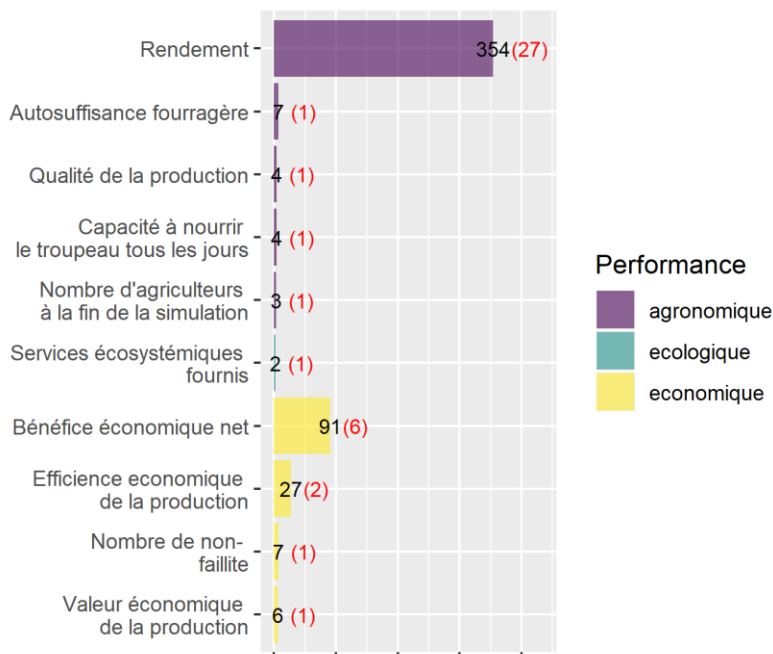
L'évaluation de la dynamique est basée sur une diversité de méthodes telles que la fonction de production frontière (Bardaji and Iraizoz, 2015; Reidsma et al., 2008b), les modèles de régression linéaire généralisés

(Reidsma et al., 2008a), les modèles logistiques mixtes (Seo, 2010), l'utilité marginale (Brunner and Grêt-Regamey, 2016) et les valeurs propres de la matrice variance-covariance (Fletcher and Hilbert, 2007). Meyer et al. (2018) et Scheffer et al. (2015) décrivent d'autres méthodes et critères de dynamique d'autres socio-écosystèmes.

Certaines études (13 %) se concentrent uniquement sur l'analyse de la dynamique des attributs du système (sensitivity analysis, Adger, 2006) sans analyser leur(s) facteur(s) explicatif(s). Les autres études utilisent deux grands types de méthodes pour identifier les facteurs explicatifs. Dix études estiment la relation entre les critères et les facteurs explicatifs potentiels (endogènes ou exogènes) à l'aide de méthodes statistiques comme les modèles mixtes linéaires (Bouttes et al., 2018; Martin et al., 2017). En revanche, environ 2/3 des études (27 articles) estiment l'effet des facteurs explicatifs sur la relation entre les critères et les variables de perturbation à l'aide de méthodes telles que les fonctions de production frontière (Bardaji and Iraizoz, 2015; Reidsma et al., 2008a). En d'autres termes, les premiers étudient l'effet de la perturbation et/ou des facteurs explicatifs de manière dissociée tandis que les seconds étudient l'effet des facteurs explicatifs sur la relation entre perturbation et dynamique de l'attribut (par exemple effet de la diversité sur l'effet du changement climatique sur la dynamique des rendements).

Attributs de performance et critères mathématiques de description de la dynamique

Sans surprise, 72 % des articles analysent la dynamique du rendement agricole considéré comme



une performance centrale à maintenir dans les systèmes agricoles (70 % des résultats, Figure 1). Au second rang, le bénéfice net économique est la deuxième performance analysée (18% des résultats et 16% des articles). 12 % des articles traitent d'autres attributs de performance agronomique (ex. qualité du produit) ou écologique (ex. services écosystémiques fournis). L'analyse multi-performance est réalisée dans 13,5% des articles (Table 1).

Figure 1. Attributs de performance dont la dynamique est étudiée face aux perturbations. Nombre de résultats (en noir) et nombre d'articles (en rouge).

	1 attribut	2 attributs
1 critère	19	0
2 critères	7	3
3 critères	5	2
4 critères	1	0

Table 1. Nombre d'articles traitant d'un ou de plusieurs attributs de performance et critère de performance.

Plusieurs critères de dynamique des attributs de performance sont utilisés : le *niveau* (35% des articles, 18% des résultats), la *variabilité* (27% des articles, 23% des résultats) et la *tendance* (38% des articles, 35% des résultats) de l'attribut, l'*élasticité* (intensité et sens du changement, 5% des articles, 7% des résultats), la *résistance* (différence de niveau avant et après perturbation, 32% des articles, 9% des résultats), le *temps de récupération* (16% des articles, 2% des résultats), la *probabilité* (5% des articles, 2% des résultats) ou la *fréquence* (8% des articles, 2% des résultats) *de dépassement un certain seuil* (par exemple un rendement très élevé ou du surpâturage) et la *distance à un état stable* (5 % des articles, 1 % des résultats) (Table 2).

CRITERE	DEFINITION	EXEMPLE	REFERENCE	NOMBRE D'ARTICLES
NIVEAU		Moyenne	Bouttes et al., 2018; Castañeda-Vera and Garrido, 2017; Ferreyra et al., 2001; Gaudin et al., 2015; Isbell et al., 2015; Leonhardt et al., 2013; Martin et al., 2017; Pfisterer and Schmid, 2002; Prieto et al., 2015; Reidsma and Ewert, 2008; Seo, 2010; Urruty et al., 2017; Zavalloni et al., 2008	13
VARIABILITE		Résidus d'une régression linéaire	(Bouttes et al., 2018; Castañeda-Vera and Garrido, 2017; Cociu and Cizma, 2015; Gaudin et al., 2015; Isbell et al., 2015; Leonhardt et al., 2013; Mäkinen et al., 2015; Martin et al., 2017; Prieto et al., 2015; Reidsma et al., 2008a; Reidsma and Ewert, 2008)	11
TENDANCE		Pente d'une régression linéaire	(Bardaji and Iraizoz, 2015; Bouttes et al., 2018; Cociu and Cizma, 2015; Di Falco and Chavas, 2008; Kahiluoto et al., 2014; Leonhardt et al., 2013; Martin et al., 2017; Matsushita et al., 2016; Prieto et al., 2015; Reidsma et al., 2008b, 2008a, 2009; Salvati, 2010; Urruty et al., 2017)	14
RESISTANCE	Différence de niveau avant et après perturbation		Brunner and Grêt-Regamey, 2016; Carlsson et al., 2017; Di Falco and Chavas, 2008; Hoover et al., 2014; Isbell et al., 2015; Martin and Magne, 2015; Mechler et al., 2010; Pfisterer and Schmid, 2002; de la Rosa et al., 2000; Seo, 2010; Stampfli et al., 2018; Zavalloni et al., 2008	12
TEMPS DE RECUPERATION	Temps ou ratio (pre/post) pour revenir au niveau avant perturbation		Barkaoui et al., 2016; Carter and Blair, 2012; Di Falco and Chavas, 2008; Isbell et al., 2015; Matsushita et al., 2016; Pfisterer and Schmid, 2002	6
DISTANCE D'UN ETAT STABLE		Valeurs propres de la matrice de variance-covariance	Chavas and Di Falco, 2017; Fletcher and Hilbert, 2007	2
PROBABILITE DE DEPASSER UN SEUIL			Ferreyra et al., 2001; Gaudin et al., 2015	2
FREQUENCE DE DEPASSEMENT D'UN SEUIL			Bitterman and Bennett, 2016; Lien et al., 2007; Sabatier et al., 2015	3

Table 2. Synthèse des critères utilisés pour décrire la dynamique des systèmes agricoles dans les études examinées.

Pour prendre en compte de la multifonctionnalité des systèmes agricoles, une analyse multicritère est effectuée dans 51 % des travaux en utilisant principalement 2 ou 3 critères de dynamique pour chaque

attribut (par exemple le *niveau*, *tendance* et *variabilité* de la productivité agricole et efficacité économique de la production dans Martin et al., 2017).

Quel cadre conceptuel pour quels critères de dynamique et vice-versa ?

Les études font explicitement référence au cadre conceptuel de la résilience (22 articles, Holling (1973); Lake (2013); Walker and Meyers (2004)), de la vulnérabilité (14 articles, définition du GIEC, McCarthy et al. (2001)) et/ou de la robustesse (2 articles, Stelling et al. (2004) ; Urruty et al. (2016)) mais aussi de la stabilité (5 articles), la durabilité (1 article) ou la résistance (7 articles, Pimm (1984)) (Figure 1). Ici, la résistance repose sur le cadre conceptuel et non sur un critère de dynamique. Les trois cadres clés de la vulnérabilité, de la résilience et de la robustesse (VRR) ne sont pas souvent combinés et une seule étude combine vulnérabilité et résilience (Figure 1) ce qui confirme qu'ils sont utilisés par différentes communautés scientifiques. Cependant, le cadre de la résilience est souvent combiné avec d'autres cadres (13/22 articles, par exemple avec résistance ou stabilité). En revanche, le cadre sur la vulnérabilité est rarement combiné à un autre (2/14 articles). Le cadre de la robustesse n'est utilisé que dans deux articles, dans les deux seuls cas (Figure 1).

La plupart des critères de dynamique sont associés à plusieurs des trois cadres conceptuels étudiés. Les critères de *niveau* et de *tendance* sont associés aux trois cadres étudiés, tandis que la *variabilité*, la *résistance*, la *probabilité de dépasser un seuil* et la *fréquence à laquelle ce seuil a été dépassé* ne sont associés qu'aux deux formes (vulnérabilité et résilience). Toutefois, comme seulement deux des documents examinés font référence à la robustesse, ce cadre est sous-représenté par rapport aux deux autres. Les critères de dynamique *récupération* et *distance à l'état stable* sont associés exclusivement au cadre de résilience. *L'élasticité* n'est utilisée que pour se référer au cadre de vulnérabilité (Bardaji and Iraizoz, 2015; Reidsma et al., 2008b) probablement parce que ce critère provient de la communauté économique et la vulnérabilité semble être un concept largement utilisé dans cette communauté.

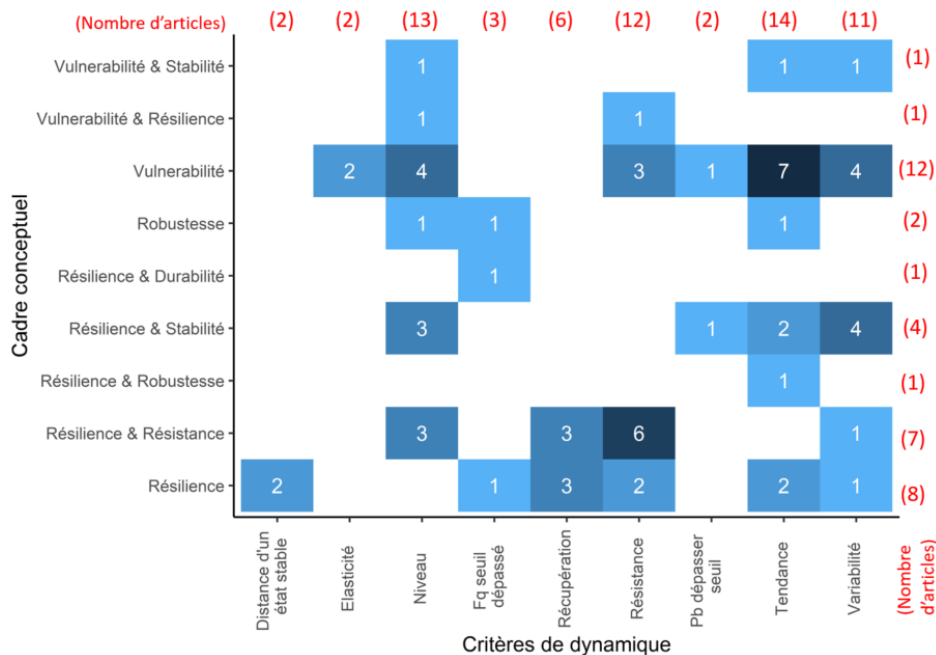


Figure 2. Nombre d'articles par cadre conceptuel (qui peuvent être mentionnés conjointement dans un article) et par critère de dynamique des attributs de performance. Comme plusieurs critères peuvent être utilisés dans une étude, la ligne "Nombre d'articles" indique le nombre d'article pour chaque critère.

Discussion

Cette revue systématique permet de produire un état de l'art des cadres conceptuels, des méthodes, des attributs et des critères étudiés par la communauté qui traite de l'évaluation quantitative de la dynamique des systèmes agricoles face aux perturbations dans leurs milieux. Comme le soulignent Dardonville et al. (soumis) au sujet des systèmes-perturbations étudiés, il existe une importante dispersion des concepts, méthodes et critères dans ces études.

La redondance, l'ambiguïté et la polysémie des cadres de VRR ont été soulignées pendant un certain temps par différents auteurs (Miller et al., 2010; Turner II, 2010; Urruty et al., 2016) et récemment (Allen et al., 2019; Grafton et al., 2019; Pimm et al., 2019). L'analyse des combinaisons de cadres et de critères utilisés dans les études examinées confirme à la fois les limites floues et les spécificités. Bien que certains critères soient associés à deux ou trois cadres différents, certains d'entre eux sont liés à un seul cadre. Par conséquent, certaines études sur la résilience semblent se focaliser sur les critères traduisant les fondements conceptuels de ce cadre *récupération et/ou distance à un état stable* suggérés dans des études fondatrices comme Holling (1973) (Allen et al., 2019). La dispersion des études sur les cadres conceptuels cache le fait qu'elles analysent les dynamiques sur les mêmes critères et rend ainsi plus difficile la capitalisation des connaissances. Notre proposition d'analyser l'ensemble de la littérature traitant de ces trois concepts clés permet de surmonter cette difficulté.

Les méthodes sont adaptées pour suivre la dynamique en cas de choc (sécheresse), sur des tendances (températures plus élevées ou précipitations plus faibles) ou des effets de bruit (variabilité des subventions). Étonnamment, nous n'avons trouvé qu'une seule étude (Isbell et al., 2015) avec des perturbations discrètes récurrentes telles celles décrites par Meyer et al. (2018) alors que les changements

climatiques sont caractérisés par des événements climatiques récurrents (une sécheresse peut se produire plusieurs années de suite) (Jentsch et al., 2007) et la variabilité économique peut être considérée comme une suite d'événements. Ceci souligne que la durée et l'étendue du cadre spatio-temporel des études (VRR "*when and where*") doivent considérer que les concepts de VRR peuvent être envisagés à court terme mais aussi à long terme (à travers plusieurs perturbations répétées).

La plupart des études examinées ne portent que sur un seul attribut de performance (86 % des articles), principalement le rendement (73 % des articles). Les études mono-performances et axées sur le rendement empêchent la prise en compte de la multifonctionnalité des systèmes agricoles. L'évaluation conjointe de la dynamique des attributs écologiques, sociaux et économiques est nécessaire pour comprendre la dynamique qui sous-tend le comportement des systèmes agricoles (Cabell and Oelofse, 2012; Darnhofer et al., 2010). Cependant, l'analyse de la dynamique de plusieurs types d'attributs nécessitera l'élaboration d'une méthodologie pour analyser la dynamique des compromis et les synergies entre eux (Hodbod et al., 2016).

Contrairement à l'approche mono-performance, la moitié des études examinées ont utilisé différents critères pour analyser la dynamique de l'attribut d'un système agricole. Cela permet aux auteurs d'apporter des points de vue complémentaires sur les dynamiques étudiées. Il est important de noter que le *niveau* ne peut pas être considéré seul comme un critère de dynamique en raison de sa définition statique intrinsèque. Lorsqu'il est combiné à d'autres critères, il fournit une information importante qui aide à relativiser les valeurs des autres critères, par exemple, il pourrait être plus facile de présenter une *tendance* positive lorsque la performance du *niveau* est faible que lorsqu'elle est élevée, toutes choses égales par ailleurs. Par exemple, l'utilisation conjointe du *niveau*, de la *tendance* et de la *variabilité* permet d'analyser comment un faible *niveau* de performance est associé à une *tendance* positive/négative et à une *variabilité* faible/élevée. L'intérêt et la cohérence de combiner des critères comme le *niveau*, la *tendance* et la *variabilité* avec les critères les plus utilisés dans les études de résilience, comme le *temps de récupération* et/ou la *distance à un état stable* restent à explorer. Certains auteurs vont plus loin dans l'approche multicritères en proposant plusieurs indicateurs par critère parce qu'ils considèrent que la définition du critère reste en discussion (ex. coefficient de variation ou son inverse pour décrire la *stabilité* dans Haughey et al. (2018)). Par exemple, Li et al. (2019) utilisent une combinaison innovante du *niveau*, de la *stabilité*, de la *résistance* et du *potentiel maximal* de rendement en utilisant respectivement quatre et deux indicateurs différents pour estimer la *stabilité* et la *résistance*. D'autres vont plus loin en comparant les indicateurs de *rétablissement*, par exemple le temps de rétablissement absolu, le temps de rétablissement normalisé de référence ou le temps normalisé en fonction de l'impact (Ingrisch and Bahn, 2018).

Peu d'études utilisent les critères explicitement mentionnés dans les cadres conceptuels ce qui remet en question l'approche traditionnelle de définition des critères selon le cadre conceptuel. En effet, la plupart des cadres conceptuels ne vont pas jusqu'à proposer des critères de dynamique explicitement opérationnels. Par exemple, l'opérationnalisation du cadre de résilience demeure un problème (Pimm et al., 2019). En outre, si la capacité d'adaptation est un concept clé et porteur dans la science de la VRR (Gallopín, 2006), seules trois études passées en revue traitent de la gestion adaptative à travers, par exemple, l'analyse des effets des scénarios de gestion sur la VRR. Pour l'instant, la capacité d'adaptation,

la troisième dimension de la définition de la vulnérabilité du GIEC (McCarthy et al., 2001) est reléguée aux études qualitatives et descriptives. Aucun article ne mobilise le cycle adaptatif de la panarchie introduit par Holling et al. (1995) probablement en raison de la difficulté de développer des critères quantitatifs de dynamique pour la quatrième phase du cycle. Seuls Fletcher and Hilbert (2007) étudient la phase de réorganisation du cycle de la panarchie en simulant chaque année le choix de la stratégie de l'agriculteur en tenant compte du passé.

Même si l'approche quantitative peut être considérée comme plus objective que l'approche qualitative, nous rejoignons Córdoba Vargas et al. (2019) sur le fait qu'il y a aussi le point de vue a priori des auteurs dans les études quantitatives. En effet, l'étendue spatio-temporelle de l'étude (par exemple, pour tenir compte de la limitation ou de l'épuisement des ressources locales), le choix de l'attribut de performance à maintenir (le maintien d'un rendement élevé est-il pertinent compte tenu des impacts environnementaux potentiels ?) et la direction de la dynamique souhaitée de l'attribut de performance (la tendance croissante du rendement ou un revenu élevé sont-ils nécessairement souhaités ?). Aussi, comme ces auteurs, nous soulignons l'importance de prendre en considération "qui définit", "dans quel but" et "selon quels intérêts" les caractéristiques des études VRR.

Conclusion

Cette étude a permis de synthétiser l'avancement de la communauté scientifique sur la question de l'évaluation de la résilience, vulnérabilité et robustesse des systèmes agricoles. Notre démarche montre qu'une grande variété de critères sont utilisés pour décrire la dynamique et qu'il faut maintenant justifier de leur choix afin de leur donner un sens du point de vue de leurs cadres conceptuels respectifs. La complexité de ces systèmes est restée encore à prendre en compte dans ces évaluations, tant sur les aspects multi-dimensionnels (critères, attributs, perturbations) que sur l'étendue temporelle des études et la diversification des alternatives testées.

Bibliographie

- Adger, W.N., 2006. Vulnerability. *Global Environmental Change* 16, 268–281.
<https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2006.02.006>
- Allen, C.R., Angeler, D.G., Chaffin, B.C., Twidwell, D., Garmestani, A., 2019. Resilience reconciled. *Nat Sustain* 2, 898–900. <https://doi.org/10.1038/s41893-019-0401-4>
- Altieri, M.A., Nicholls, C.I., Henao, A., Lana, M.A., 2015. Agroecology and the design of climate change-resilient farming systems. *Agronomy for Sustainable Development* 35, 869–890.
<https://doi.org/10.1007/s13593-015-0285-2>
- Bardaji, I., Iraizoz, B., 2015. Uneven responses to climate and market influencing the geography of high-quality wine production in Europe. *Regional Environmental Change* 15, 79–92.
<https://doi.org/10.1007/s10113-014-0623-y>
- Barkaoui, K., Roumet, C., Volaire, F., 2016. Mean root trait more than root trait diversity determines drought resilience in native and cultivated Mediterranean grass mixtures. *Agriculture, Ecosystems & Environment* 231, 122–132. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2016.06.035>
- Biggs, R., Schlüter, M., Biggs, D., Bohensky, E.L., Burnsilver, S., Cundill, G., Dakos, V., Daw, T.M., Evans, L.S., Kotschy, K., Leitch, A.M., Meek, C., Quinlan, A., Raudsepp-Hearne, C., Robards, M.D., Schoon, M.L., Schultz, L., West, P.C., 2012. Toward principles for enhancing the resilience of

- ecosystem services. *Annual Review of Environment and Resources* 37, 421–448.
<https://doi.org/10.1146/annurev-environ-051211-123836>
- Bitterman, P., Bennett, D.A., 2016. Constructing stability landscapes to identify alternative states in coupled social-ecological agent-based models. *Ecology and Society* 21.
<https://doi.org/10.5751/ES-08677-210321>
- Bouttes, M., San Cristobal, M., Martin, G., 2018. Vulnerability to climatic and economic variability is mainly driven by farmers' practices on French organic dairy farms. *European Journal of Agronomy* 94, 89–97. <https://doi.org/10.1016/j.eja.2018.01.013>
- Brunner, S.H., Grêt-Regamey, A., 2016. Policy strategies to foster the resilience of mountain social-ecological systems under uncertain global change. *Environmental Science & Policy* 66, 129–139.
<https://doi.org/10.1016/j.envsci.2016.09.003>
- Brzezina, N., Kopainsky, B., Mathijs, E., 2016. Can Organic Farming Reduce Vulnerabilities and Enhance the Resilience of the European Food System? A Critical Assessment Using System Dynamics Structural Thinking Tools. *Sustainability* 8, 971. <https://doi.org/10.3390/su8100971>
- Cabell, J.F., Oelofse, M., 2012. An Indicator Framework for Assessing Agroecosystem Resilience. *Ecology and Society* 17. <https://doi.org/10.5751/ES-04666-170118>
- Carlsson, M., Merten, M., Kayser, M., Isselstein, J., Wrage-Mönnig, N., 2017. Drought stress resistance and resilience of permanent grasslands are shaped by functional group composition and N fertilization. *Agriculture, Ecosystems & Environment* 236, 52–60.
<https://doi.org/10.1016/j.agee.2016.11.009>
- Carpenter, S., Walker, B., Anderies, J.M., Abel, N., 2001. From Metaphor to Measurement: Resilience of What to What? *Ecosystems* 4, 765–781. <https://doi.org/10.1007/s10021-001-0045-9>
- Carter, D.L., Blair, J.M., 2012. High richness and dense seeding enhance grassland restoration establishment but have little effect on drought response. *Ecological Applications* 22, 1308–1319.
<https://doi.org/10.1890/11-1970.1>
- Castañeda-Vera, A., Garrido, A., 2017. Evaluation of risk management tools for stabilising farm income under CAP 2014–2020. *Economía Agraria y Recursos Naturales* 17, 3.
<https://doi.org/10.7201/earn.2017.01.01>
- Chavas, J.-P., Di Falco, S., 2017. Resilience, Weather and Dynamic Adjustments in Agroecosystems: The Case of Wheat Yield in England. *Environ Resource Econ* 67, 297–320.
<https://doi.org/10.1007/s10640-015-9987-9>
- Cociu, A., Cizma, G.D., 2015. MAIZE YIELD AND ITS STABILITY AS AFFECTED BY TILLAGE AND CROP RESIDUE MANAGEMENT IN THE EASTERN ROMANIAN DANUBE PLAIN 6.
- Coomes, O.T., Barham, B.L., MacDonald, G.K., Ramankutty, N., Chavas, J.-P., 2019. Leveraging total factor productivity growth for sustainable and resilient farming. *Nature Sustainability* 2, 22–28.
<https://doi.org/10.1038/s41893-018-0200-3>
- Dardonville, M., Bockstaller, C., Urruty, N., Théron, O., 2019. Influence of diversity and intensification level on resilience/vulnerability/robustness of agricultural systems. Under submission.
- Darnhofer, I., Fairweather, J., Moller, H., 2010. Assessing a farm's sustainability: insights from resilience thinking. *International Journal of Agricultural Sustainability* 8, 186–198.
<https://doi.org/10.3763/ijas.2010.0480>
- de la Rosa, D., Moreno, J.A., Mayol, F., Bonsón, T., 2000. Assessment of soil erosion vulnerability in western Europe and potential impact on crop productivity due to loss of soil depth using the ImpelERO model. *Agriculture, Ecosystems & Environment* 81, 179–190.
[https://doi.org/10.1016/S0167-8809\(00\)00161-4](https://doi.org/10.1016/S0167-8809(00)00161-4)
- Di Falco, S., Chavas, J.-P., 2008. Rainfall Shocks, Resilience, and the Effects of Crop Biodiversity on Agroecosystem Productivity. *Land Economics* 84, 83–96. <https://doi.org/10.3368/le.84.1.83>

- Douxchamps, S., Debevec, L., Giordano, M., Barron, J., 2017. Monitoring and evaluation of climate resilience for agricultural development – A review of currently available tools. *World Development Perspectives* 5, 10–23. <https://doi.org/10.1016/j.wdp.2017.02.001>
- Ferreira, R.A., Podesta, G.P., Messina, C.D., Letson, D., Dardanelli, J., Guevara, E., Meira, S., 2001. A linked-modeling framework to estimate maize production risk associated with ENSO-related climate variability in Argentina. *Agricultural and Forest Meteorology* 107, 177–192.
- Fletcher, C.S., Hilbert, D.W., 2007. Resilience in landscape exploitation systems. *Ecological Modelling* 201, 440–452. <https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2006.10.011>
- Gallopin, G.C., 2006. Linkages between vulnerability, resilience, and adaptive capacity. *Global Environmental Change* 16, 293–303. <https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2006.02.004>
- Gaudin, A.C.M., Tolhurst, T.N., Ker, A.P., Janovicek, K., Tortora, C., Martin, R.C., Deen, W., 2015. Increasing Crop Diversity Mitigates Weather Variations and Improves Yield Stability. *PLOS ONE* 10, e0113261. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0113261>
- Gil, J., Cohn, A.S., Duncan, J., Newton, P., Vermeulen, S., 2017. The resilience of integrated agricultural systems to climate change. *WIREs Climate Change* 8. <https://doi.org/10.1002/wcc.461>
- Gillespie-Marthaler, L., Nelson, K.S., Baroud, H., Kosson, D.S., Abkowitz, M., 2019. An integrative approach to conceptualizing sustainable resilience. *Sustainable and Resilient Infrastructure* 4, 66–81. <https://doi.org/10.1080/23789689.2018.1497880>
- Grafton, R.Q., Doyen, L., Béné, C., Borgomeo, E., Brooks, K., Chu, L., Cumming, G.S., Dixon, J., Dovers, S., Garrick, D., Helfgott, A., Jiang, Q., Katic, P., Kompas, T., Little, L.R., Matthews, N., Ringler, C., Squires, D., Steinshamn, S.I., Villasante, S., Wheeler, S., Williams, J., Wyrwoll, P.R., 2019. Realizing resilience for decision-making. *Nat Sustain* 2, 907–913. <https://doi.org/10.1038/s41893-019-0376-1>
- Haughey, E., Suter, M., Hofer, D., Hoekstra, N.J., McElwain, J.C., Lüscher, A., Finn, J.A., 2018. Higher species richness enhances yield stability in intensively managed grasslands with experimental disturbance. *Sci Rep* 8, 15047. <https://doi.org/10.1038/s41598-018-33262-9>
- Hodobod, J., Barreteau, O., Allen, C., Magda, D., 2016. Managing adaptively for multifunctionality in agricultural systems. *Journal of Environmental Management* 183, 379–388. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2016.05.064>
- Holling, C.S., 1973. Resilience and Stability of Ecological Systems. *Annual Review of Ecology and Systematics* 4, 1–23. <https://doi.org/10.1146/annurev.es.04.110173.000245>
- Hoover, D.L., Knapp, A.K., Smith, M.D., 2014. Resistance and resilience of a grassland ecosystem to climate extremes. *Ecology* 95, 2646–2656. <https://doi.org/10.1890/13-2186.1>
- Ingrisch, J., Bahn, M., 2018. Towards a Comparable Quantification of Resilience. *Trends in Ecology & Evolution* 33, 251–259. <https://doi.org/10.1016/j.tree.2018.01.013>
- IPCC, Stocker, T.F., Qin, D., Plattner, G.-K., Tignor, M.M.B., Allen, S.K., Boschung, J., Nauels, A., Xia, Y., Bex, V., Midgley, P.M., 2013. Working Group I Contribution to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change 14.
- Isbell, F., Craven, D., Connolly, J., Loreau, M., Schmid, B., Beierkuhnlein, C., Bezemer, T.M., Bonin, C., Bruelheide, H., de Luca, E., Ebeling, A., Griffin, J.N., Guo, Q., Hautier, Y., Hector, A., Jentsch, A., Kreyling, J., Lanta, V., Manning, P., Meyer, S.T., Mori, A.S., Naeem, S., Niklaus, P.A., Polley, H.W., Reich, P.B., Roscher, C., Seabloom, E.W., Smith, M.D., Thakur, M.P., Tilman, D., Tracy, B.F., van der Putten, W.H., van Ruijven, J., Weigelt, A., Weisser, W.W., Wilsey, B., Eisenhauer, N., 2015. Biodiversity increases the resistance of ecosystem productivity to climate extremes. *Nature* 526, 574–577. <https://doi.org/10.1038/nature15374>
- Jentsch, A., Kreyling, J., Beierkuhnlein, C., 2007. A new generation of climate-change experiments: events, not trends. *Frontiers in Ecology and the Environment* 5, 365–374. [https://doi.org/10.1890/1540-9295\(2007\)5\[365:ANGOCE\]2.0.CO;2](https://doi.org/10.1890/1540-9295(2007)5[365:ANGOCE]2.0.CO;2)

- Kahiluoto, H., Kaseva, J., Hakala, K., Himanen, S.J., Jauhiainen, L., Rötter, R.P., Salo, T., Trnka, M., 2014. Cultivating resilience by empirically revealing response diversity. *Global Environmental Change* 25, 186–193. <https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2014.02.002>
- Lake, P.S., 2013. Resistance, Resilience and Restoration. *Ecological Management & Restoration* 14, 20–24. <https://doi.org/10.1111/emr.12016>
- Leonhardt, S.D., Gallai, N., Garibaldi, L.A., Kuhlmann, M., Klein, A.-M., 2013. Economic gain, stability of pollination and bee diversity decrease from southern to northern Europe. *Basic and Applied Ecology* 14, 461–471. <https://doi.org/10.1016/j.baae.2013.06.003>
- Li, M., Peterson, C.A., Tautges, N.E., Scow, K.M., Gaudin, A.C.M., 2019. Yields and resilience outcomes of organic, cover crop, and conventional practices in a Mediterranean climate. *Sci Rep* 9, 12283. <https://doi.org/10.1038/s41598-019-48747-4>
- Lien, G., Hardaker, J.B., Flaten, O., 2007. Risk and economic sustainability of crop farming systems. *Agricultural Systems* 94, 541–552. <https://doi.org/10.1016/j.agsy.2007.01.006>
- Mäkinen, H., Kaseva, J., Virkajärvi, P., Kahiluoto, H., 2015. Managing resilience of forage crops to climate change through response diversity. *Field Crops Research* 183, 23–30. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2015.07.006>
- Martin, G., Magne, M.A., 2015. Agricultural diversity to increase adaptive capacity and reduce vulnerability of livestock systems against weather variability – A farm-scale simulation study. *Agriculture, Ecosystems & Environment* 199, 301–311. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2014.10.006>
- Martin, G., Magne, M.-A., Cristobal, M.S., 2017. An Integrated Method to Analyze Farm Vulnerability to Climatic and Economic Variability According to Farm Configurations and Farmers' Adaptations. *Frontiers in Plant Science* 8. <https://doi.org/10.3389/fpls.2017.01483>
- Matsushita, K., Yamane, F., Asano, K., 2016. Linkage between crop diversity and agro-ecosystem resilience: Nonmonotonic agricultural response under alternate regimes. *Ecological Economics* 126, 23–31. <https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2016.03.006>
- McCarthy, J.J., Canziani, O.F., Leary, N.A., Dokken, D.J., White, K.S., 2001. Climate change 2001: impacts, adaptation, and vulnerability: contribution of Working Group II to the third assessment report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press.
- Mechler, R., Hochrainer, S., Aaheim, A., Salen, H., Wreford, A., 2010. Modelling economic impacts and adaptation to extreme events: Insights from European case studies. *Mitig Adapt Strateg Glob Change* 15, 737–762. <https://doi.org/10.1007/s11027-010-9249-7>
- Meuwissen, M.P.M., Feindt, P.H., Spiegel, A., Termeer, C.J.A.M., Mathijs, E., Mey, Y. de, Finger, R., Balmann, A., Wauters, E., Urquhart, J., Vigani, M., Zawalińska, K., Herrera, H., Nicholas-Davies, P., Hansson, H., Paas, W., Slijper, T., Coopmans, I., Vroege, W., Ciecchomska, A., Accatino, F., Kopainsky, B., Poortvliet, P.M., Candel, J.J.L., Maye, D., Severini, S., Senni, S., Soriano, B., Lagerkvist, C.-J., Peneva, M., Gavrilescu, C., Reidsma, P., 2019. A framework to assess the resilience of farming systems. *Agricultural Systems* 176, 102656. <https://doi.org/10.1016/j.agsy.2019.102656>
- Meyer, K., Hoyer-Leitzel, A., Iams, S., Klasky, I., Lee, V., Ligtenberg, S., Bussmann, E., Zeeman, M.L., 2018. Quantifying resilience to recurrent ecosystem disturbances using flow–kick dynamics. *Nature Sustainability* 1, 671–678. <https://doi.org/10.1038/s41893-018-0168-z>
- Miller, F., Osbahr, H., Boyd, E., Thomalla, F., Bharwani, S., Ziervogel, G., Walker, B., Birkmann, J., van der Leeuw, S., Rockström, J., Hinkel, J., Downing, T., Folke, C., Nelson, D., 2010. Resilience and Vulnerability: Complementary or Conflicting Concepts? *Ecology and Society* 15. <https://doi.org/10.5751/ES-03378-150311>
- Müller, F., 2005. Indicating ecosystem and landscape organisation. *Ecological Indicators* 5, 280–294. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2005.03.017>

- Mumby, P.J., Chollett, I., Bozec, Y.-M., Wolff, N.H., 2014. Ecological resilience, robustness and vulnerability: how do these concepts benefit ecosystem management? *Current Opinion in Environmental Sustainability* 7, 22–27. <https://doi.org/10.1016/j.cosust.2013.11.021>
- Nelson, K., Gillespie-Marthaler, L., Baroud, H., Abkowitz, M., Kosson, D., 2019. An integrated and dynamic framework for assessing sustainable resilience in complex adaptive systems. *Sustainable and Resilient Infrastructure* 1–19. <https://doi.org/10.1080/23789689.2019.1578165>
- Pfisterer, A.B., Schmid, B., 2002. Diversity-dependent production can decrease the stability of ecosystem functioning. *Nature* 416, 84–86. <https://doi.org/10.1038/416084a>
- Pimm, S.L., 1984. The complexity and stability of ecosystems.
- Pimm, S.L., Donohue, I., Montoya, J.M., Loreau, M., 2019. Measuring resilience is essential to understand it. *Nat Sustain* 2, 895–897. <https://doi.org/10.1038/s41893-019-0399-7>
- Prieto, I., Violle, C., Barre, P., Durand, J.-L., Ghesquiere, M., Litrico, I., 2015. Complementary effects of species and genetic diversity on productivity and stability of sown grasslands. *Nature Plants* 1, 15033. <https://doi.org/10.1038/nplants.2015.33>
- Quinlan, A.E., Berbés-Blázquez, M., Haider, L.J., Peterson, G.D., 2016. Measuring and assessing resilience: broadening understanding through multiple disciplinary perspectives. *Journal of Applied Ecology* 53, 677–687. <https://doi.org/10.1111/1365-2664.12550>
- Reidsma, P., Ewert, F., 2008. Regional Farm Diversity Can Reduce Vulnerability of Food Production to Climate Change. *Ecology and Society* 13. <https://doi.org/10.5751/ES-02476-130138>
- Reidsma, P., Ewert, F., Lansink, A.O., Leemans, R., 2009. Adaptation to climate change and climate variability in European agriculture: The importance of farm level responses. *European Journal of Agronomy* 32, 91–102. <https://doi.org/10.1016/j.eja.2009.06.003>
- Reidsma, P., Ewert, F., Lansink, A.O., Leemans, R., 2008a. Vulnerability and adaptation of European farmers: a multi-level analysis of yield and income responses to climate variability. *Reg Environ Change* 9, 25. <https://doi.org/10.1007/s10113-008-0059-3>
- Reidsma, P., Oude Lansink, A., Ewert, F., 2008b. Economic impacts of climatic variability and subsidies on European agriculture and observed adaptation strategies. *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change* 14, 35–59. <https://doi.org/10.1007/s11027-008-9149-2>
- Sabatier, R., Oates, L.G., Brink, G.E., Bleier, J., Jackson, R.D., 2015. Grazing in an Uncertain Environment: Modeling the Trade-Off between Production and Robustness. *Agronomy Journal* 107, 257. <https://doi.org/10.2134/agronj14.0357>
- Salvati, L., 2010. Exploring the Relationship between Agricultural Productivity and Land Degradation in a Dry Region of Southern Europe 6.
- Scheffer, M., Carpenter, S.R., Dakos, V., van Nes, E.H., 2015. Generic Indicators of Ecological Resilience: Inferring the Chance of a Critical Transition. *Annu. Rev. Ecol. Evol. Syst.* 46, 145–167. <https://doi.org/10.1146/annurev-ecolsys-112414-054242>
- Seo, S.N., 2010. A Microeconometric Analysis of Adapting Portfolios to Climate Change: Adoption of Agricultural Systems in Latin America. *Applied Economic Perspectives and Policy* 32, 489–514. <https://doi.org/10.1093/aep/ppq013>
- Stampfli, A., Bloor, J.M.G., Fischer, M., Zeiter, M., 2018. High land-use intensity exacerbates shifts in grassland vegetation composition after severe experimental drought. *Global Change Biology* 24, 2021–2034. <https://doi.org/10.1111/gcb.14046>
- Stelling, J., Sauer, U., Szallasi, Z., Doyle, F.J., Doyle, J., 2004. Robustness of Cellular Functions. *Cell* 118, 675–685. <https://doi.org/10.1016/j.cell.2004.09.008>
- Tendall, D.M., Joerin, J., Kopainsky, B., Edwards, P., Shreck, A., Le, Q.B., Kruetli, P., Grant, M., Six, J., 2015. Food system resilience: Defining the concept. *Global Food Security* 6, 17–23. <https://doi.org/10.1016/j.gfs.2015.08.001>

- Turner II, B.L., 2010. Vulnerability and resilience: Coalescing or paralleling approaches for sustainability science? *Global Environmental Change* 20, 570–576.
<https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2010.07.003>
- Urruty, N., Guyomard, H., Tailliez-Lefebvre, D., Huyghe, C., 2017. Factors of winter wheat yield robustness in France under unfavourable weather conditions. *European Journal of Agronomy* 90, 174–183. <https://doi.org/10.1016/j.eja.2017.08.002>
- Urruty, N., Tailliez-Lefebvre, D., Huyghe, C., 2016. Stability, robustness, vulnerability and resilience of agricultural systems. A review. *Agronomy for Sustainable Development* 36.
<https://doi.org/10.1007/s13593-015-0347-5>
- Walker, B., Meyers, J.A., 2004. Thresholds in Ecological and Social–Ecological Systems: a Developing Database. *Ecology and Society* 9. <https://doi.org/10.5751/ES-00664-090203>
- Wiréhn, L., Danielsson, Å., Neset, T.-S.S., 2015. Assessment of composite index methods for agricultural vulnerability to climate change. *Journal of Environmental Management* 156, 70–80.
<https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2015.03.020>
- Wright, B.D., 2011. The Economics of Grain Price Volatility. *Applied Economic Perspectives and Policy* 33, 32–58. <https://doi.org/10.1093/aep/33.1.32>
- Zavalloni, C., Gielen, B., Lemmens, C.M.H.M., Boeck, H.J.D., Blasi, S., Bergh, S.V. den, Nijs, I., Ceulemans, R., 2008. Does a warmer climate with frequent mild water shortages protect grassland communities against a prolonged drought? *Plant Soil* 308, 119–130.
<https://doi.org/10.1007/s11104-008-9612-6>