



HAL
open science

Les indicateurs de biodiversité pour accompagner les agriculteurs : embarras du choix ou pénurie ?

Christian Bockstaller, Françoise Lassere-Joulain, Helmut Meiss, C. Sausse, Hayo van Der Werf, T. Denoirjean, Lionel Ranjard, Frédérique Angevin, Nadia Michel, V. Tosser, et al.

► **To cite this version:**

Christian Bockstaller, Françoise Lassere-Joulain, Helmut Meiss, C. Sausse, Hayo van Der Werf, et al.. Les indicateurs de biodiversité pour accompagner les agriculteurs : embarras du choix ou pénurie ?. *Innovations Agronomiques*, 2019, 75, pp.73-86. <10.15454/bzmzzf>. <hal-02392175>

HAL Id: hal-02392175

<https://hal.science/hal-02392175v1>

Submitted on 3 Dec 2019

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.



Distributed under a Creative Commons CC BY-NC-ND 4.0 - Attribution - Non-commercial use - No Derivative Works - International License

Les indicateurs de biodiversité pour accompagner les agriculteurs : embarras du choix ou pénurie ?

Bockstaller C.¹, Lassere-Joulin F.², Meiss H.², Sausse C.³, van der Werf H.⁴, Denoirjean T.⁵, Ranjard L.⁶, Angevin F.⁷, Manneville V.⁸, Michel N.², Tosser V.⁵, Plantureux S.²

¹ UMR LAE, Université de Lorraine, INRA, F-68000 Colmar

² UMR LAE Université de Lorraine, INRA, F-54500 Vandoeuvre

³ Terres Inovia, F-78850 Thiverval – Grignon

⁴ UMR SAS, INRA AgroCampus, F-35000 Rennes

⁵ Arvalis Institut du Végétal, F-91720 Boigneville

⁶ UMR Agroécologie, AgroSup Dijon, INRA, Univ. Bourgogne, Univ. Bourgogne Franche-Comté, F-21000 Dijon

⁷ UR EcolInnov, F-78850 Thiverval – Grignon

⁸ Institut de l'Elevage, F-63170 Aubière

Correspondance : christian.bockstaller@inra.fr

Résumé

Toute action en faveur de la conservation ou de la restauration de la biodiversité nécessitera à un stade ou un autre de la démarche une phase d'évaluation de l'impact de systèmes existants ou en cours de conception. L'objectif de cet article sera de faire un point sur les progrès accomplis depuis l'Expertise Collective INRA « Agriculture et Biodiversité » de 2008 en termes d'indicateurs disponibles pour accompagner les agriculteurs dans une meilleure prise en compte des enjeux de biodiversité dans la conduite des systèmes agricoles. Nous nous centrerons sur les systèmes de prairies et de grandes cultures et sur la biodiversité, surtout au niveau des espèces. La revue montre qu'il existe de nombreux indicateurs de cause (basés sur des variables de pratiques) et d'effet mesurés (p. ex. la diversité floristique) mais que le choix est plus restreint pour les indicateurs d'effet prédictifs dont une majorité sont qualitatifs.

Mots-clés : Sol, Prairie permanente, Parcelle cultivée, Exploitation agricole, Territoire, Evaluation multicritère.

Abstract: Biodiversity indicators to support farmers ; plethora or paucity?

Every action to sustain biodiversity conservation or restoration requires, at one stage or another of the process, an evaluation of the impact of existing system or system being newly designed. The purpose of this article is to review the progress made since the INRA review "Agriculture and Biodiversity" in 2008, regarding indicators available to help farmers better addressing biodiversity in the management of farming systems. We will focus on grassland and arable cropping systems, mainly on species diversity. The review shows that there are numerous causal indicators (based on management variables) and measured effect indicators while the choice is more restricted for predictive effect indicators, which are mainly qualitative.

Keywords: Soil, Grassland, Cropped field, Farm, Territory, Multicriteria assessment.

Introduction

De récents travaux ont montré que l'érosion de la biodiversité liée aux activités humaines, et en particulier à l'agriculture s'accélère et même dépasse certaines prévisions (Ceballos *et al.*, 2017 ; Sánchez-Bayo et Wyckhuys, 2019). Cet appauvrissement de grande ampleur porte sur les trois dimensions de la biodiversité : diversité génétique au sein des espèces, diversité des espèces, et diversité des écosystèmes. Pour l'érosion de la diversité génétique et spécifique, certains auteurs considèrent qu'un seuil d'acceptabilité pour la planète a été dépassée et que l'agriculture y joue un rôle majeur (Campbell *et al.*, 2017). La conservation de la biodiversité constitue ainsi un enjeu fondamental du développement durable de par sa valeur patrimoniale mais aussi par son rôle dans la fourniture de services écosystémiques. Ceux-ci sont indispensables pour trouver des compromis acceptables entre productivité et conservation des ressources naturelles.

Toute action en faveur de la conservation ou de la restauration de la biodiversité nécessitera à un stade ou un autre de la démarche une phase d'évaluation de l'impact de systèmes existants ou en cours de conception. Ceci est vrai en particulier dans le domaine agricole pour tous les travaux en faveur d'une prise en compte des enjeux de durabilité dans la conduite des cultures et des ateliers d'élevages, et en particulier dans la conception de systèmes innovants. L'impossibilité méthodologique de réaliser des mesures directes, ou le manque de moyens, conduit les acteurs à faire appel à des indicateurs (Lairez *et al.*, 2015). Ceci est vrai en particulier pour la biodiversité.

Ainsi, l'émergence de l'enjeu biodiversité sur les scènes internationales comme nationales suite à la conférence de Rio en 1992, s'est rapidement accompagnée de nombreux travaux sur la question des indicateurs. Les auteurs de l'Expertise Collective (ESCO) de l'INRA « Agriculture et Biodiversité » notaient déjà qu'il s'agissait d'un champ de recherche particulièrement actif (Le Roux *et al.*, 2008). Deux types d'indicateurs y étaient distingués : les indicateurs directs reposant sur des mesures de diversité et/ou d'abondance de groupes taxonomiques (oiseaux, pollinisateurs, carabes, plantes vasculaires, etc.), et les indicateurs indirects reposant sur des variables liées à l'occupation des sols et/ou des pratiques agricoles.

L'objectif de cet article est de faire un point sur les progrès accomplis depuis 2008 en termes d'indicateurs disponibles pour accompagner les agriculteurs dans une meilleure prise en compte des enjeux de biodiversité dans la conduite des systèmes agricoles. Vue l'ampleur de la tâche, nous consacrerons cette revue principalement à la biodiversité au niveau spécifique par rapport à la diversité génétique ou des écosystèmes, ou encore la biodiversité fonctionnelle liée aux traits des espèces. Nous nous centrerons sur les prairies et les grandes cultures. Dans une première partie, nous ferons un point sur les choix préalables qui doivent conduire tout choix d'indicateurs (Lairez *et al.*, 2015) et sur les méthodes de mesures de la diversité. Puis nous poursuivrons avec une revue des indicateurs pour le compartiment sol, les parcelles de prairies, de culture et au niveau de l'exploitation agricole et du paysage, ainsi que dans le cadre de l'analyse de cycle de vie.

1. Choix d'un indicateur: des questions préalables

Lairez *et al.* (2015) insistent sur la nécessité, avant tout choix d'indicateurs, de clarifier certaines questions autour de l'évaluation pour définir les réels besoins et éviter des choix inadaptés qui ne correspondraient pas *in fine* aux besoins des acteurs de l'évaluation.

1.1 Quels acteurs dans l'évaluation, quelle finalité ?

Dans une démarche d'évaluation, il existe toujours un commanditaire qui est à l'origine de la demande, un concepteur qui conçoit ou sélectionne une méthode parmi celles disponibles, un applicateur et un bénéficiaire. Les quatre peuvent être différents : l'Agence Française pour la Biodiversité commande à un institut de recherche une méthode qu'appliquent les chambres d'agriculture au bénéfice des

agriculteurs, ou être confondus dans le même acteur : le chercheur qui décide de développer une méthode qu'il va appliquer sur ses expérimentations, et tous les cas intermédiaires. Une mauvaise identification de l'applicateur peut conduire à un système informatique inadapté, qui peut nécessiter sa refonte avec en conséquence des coûts supplémentaires.

En fonction des acteurs, les finalités vont aussi varier. Lairez *et al.* (2015) distinguent trois grandes finalités :

- **Connaître** pour sensibiliser, pour fournir des connaissances sur différents systèmes ou sur l'évolution temporelle d'un système, pour rendre compte d'une action (y compris sous l'aspect réglementaire),
- **Aider à la décision** pour identifier les éléments à améliorer d'un système, pour choisir, classer, trier des systèmes,
- **Communiquer** pour accéder au marché (certification), pour une promotion non marchande.

1.2 Quelle biodiversité ?

Un premier point à préciser est la notion « d'indicateur de biodiversité » par rapport à la notion de « bioindicateurs ». Ces derniers reposent sur une évaluation de l'impact d'une activité humaine sur une composante de l'environnement. Ils permettent par exemple d'évaluer la pollution des sols via une composante de la biodiversité comme la présence d'une espèce de plante accumulatrice d'un polluant. Ce sont des « indicateurs tiré de la biodiversité », tandis que les indicateurs qui nous intéressent sont « pour la biodiversité », c.-à-d. estiment un impact sur la biodiversité (Duelli et Obrist, 2003).

Si la biodiversité est souvent vue en termes de nombre d'entités différentes (gènes, espèces, habitats) ou en abondance relative de ces entités, des aspects de composition des communautés, de distribution spatiale des méta-populations ou de structure des réseaux trophiques sont aussi à considérer (Diaz *et al.*, 2006).

Dans le cas des écosystèmes agricoles, il a aussi été nécessaire de distinguer :

- La **biodiversité planifiée**, c.-à-d. celle gérée directement par l'agriculteur, la diversité des animaux et des races, des espèces et variétés végétales, qui vont déterminer une occupation des sols.
- La **biodiversité associée**, d'espèces sauvages non gérées directement par l'agriculteur. Cette dernière peut encore se répartir entre une *biodiversité para-agricole* source de services écosystémiques comme la régulation des ravageurs par des espèces d'auxiliaires des cultures mais aussi de disservices comme les dommages causés aux cultures par les ravageurs, et une *biodiversité extra-agricole* hébergée par les écosystèmes agricoles et donc sous influence des pratiques agricoles, mais sans effets connus sur l'agriculture (Denoirjean, 2018).

1.3 Quels systèmes ?

Il s'agit de définir les niveaux d'organisations spatiales (parcelle, exploitation, territoire) et temporelles mais aussi les limites du système. Dans une démarche d'analyse de cycle de vie qui constitue toute une branche de l'évaluation environnementale faisant l'objet d'une norme internationale (ISO 14040 et ISO 14044), l'intérêt n'est pas porté seulement aux impacts de l'activité de production (agricole ou autre) mais aussi aux impacts « amonts » liés à la production des intrants et « avals » liés à l'utilisation de la production et à l'élimination ou utilisation/recyclage des déchets. Dans le cas des systèmes agricoles, la limite « aval » est souvent fixée à la sortie de l'exploitation. Cette démarche rigoureuse permet des comparaisons entre systèmes totalement différents et d'identifier des transferts d'impacts

d'une étape à une autre. Dans les systèmes agricoles, la diversité peut être réfléchi à l'échelle de ce qui est directement géré par l'agriculteur (la parcelle, l'animal) mais aussi indirectement (ex : gestion volontaire ou non des bords de parcelles, effets des pratiques sur la biodiversité d'un cours d'eau et bassin versant, voire du milieu marin, ...)

1.4 Quels indicateurs ?

Lairez *et al.* (2015) à la suite de Bockstaller *et al.* (2011) ont défini une typologie d'indicateurs plus fine que celle proposée dans l'Expertise Collective (ESCO) de 2008 en distinguant :

- Des **indicateurs de cause** reposant généralement sur une variable ou une combinaison simple de variables de pratiques. Ceux-ci sont aussi appelés « proxys ».
- Des **indicateurs d'effets prédictifs** reposant sur des sorties de modèles prédictifs opérationnels, reposant sur un nombre limité de variables d'entrées accessibles, complexes issus de la recherche s'affranchissant des contraintes de disponibilité des données.
- Des **indicateurs d'effets mesurés** qui correspondent aux indicateurs directs de l'ESCO de 2008.

Les indicateurs d'effets prédictifs constituent une nouvelle classe d'indicateurs indirects non mentionnés dans l'ESCO de 2008. Leur intérêt réside dans le fait qu'ils constituent un compromis entre la faisabilité permise par les indicateurs de cause et l'intégration des processus – et donc une meilleure estimation de la réalité - rendue possible par les indicateurs d'effets mesurés. Par ailleurs ils permettent de mettre en relation les causes aux effets, et de réaliser des évaluations *ex ante* dans le cadre de système conçus informatiquement, ou des évaluations de scénarios pour simuler les effets de changements de pratiques, etc.

Selon les choix effectués et notamment les finalités, mais aussi les moyens disponibles, tel ou tel type d'indicateur sera privilégié.

1.5 Comment « mesurer » la diversité des espèces ?

Différents indices sont couramment utilisés pour prendre en compte différentes dimensions de la diversité des espèces, dont notamment le nombre d'espèces (richesse spécifique) et leur abondance relative. La richesse spécifique est l'indice le plus utilisé mais ne couvre qu'une seule dimension de la diversité. D'autres combinent plusieurs dimensions parmi lesquels le plus « populaire » est l'indice de Shannon ($= -\sum_S p_i \ln(p_i)$ avec S le nombre d'espèces, et p_i la proportion entre 0 et 1 de l'espèce i), (Magurran, 2004). Celui-ci a été développé à l'origine pour évaluer l'entropie dans un ensemble d'informations. L'indice de Simpson réciproque ($= 1/\sum_S p_i^2$ avec S le nombre d'espèces, et p_i la proportion entre 0 et 1 de l'espèce i) est un véritable indice de diversité (Chao *et al.*, 2014) et a l'avantage de donner des informations plus interprétables, en donnant le nombre d'espèces dominantes. Ces indicateurs peuvent être complétés par des indices d'équitabilité de la répartition des différentes espèces d'un milieu.

2. Une vue d'ensemble des indicateurs disponibles

Sans prétendre à l'exhaustivité, nous chercherons à illustrer la diversité des indicateurs au niveau parcellaire, pour le compartiment sol, en système de prairie permanente ou de grande culture et aux niveaux d'organisation supérieurs, de l'exploitation agricole et du territoire, et enfin pour l'analyse du cycle de vie. Nous nous appuyerons sur la typologie établie plus haut et nous nous centrerons surtout sur des exemples français.

2.1 Pour le compartiment sol

Le sol est considéré par certains auteurs comme le compartiment le plus diversifié en termes de nombre d'espèces (Bender *et al.*, 2016) et fait l'objet d'investigations de plus en plus nombreuses.

2.1.1 Indicateurs d'effet mesurés

De nombreux groupes taxonomiques sont utilisés, allant des microorganismes (bactéries et champignons), nématodes, jusqu'à différents groupes de la macrofaune (lombrics, carabes, staphylins, araignées), comme illustré dans le travail de Henneron *et al.* (2015) sur l'essai système de La Cage à Versailles. Pour certains groupes, une approche fonctionnelle est associée comme pour les nématodes avec le calcul d'indices à partir de groupes trophiques (bactériophages, fongivores, carnivores, etc.), ou pour les vers de terre à partir de l'habitat et des mouvements verticaux dans le sol (anéciques, endogés, épigés). Pour les communautés microbiennes, des techniques de biologie moléculaire permettent d'aller un peu plus loin que la mesure de biomasse microbienne totale, ceci à l'aide de PCR quantitative en temps réel avec des amorces d'ADN 16S et 18S. Des méthodes de séquençage massif développées depuis 5 ans permettent d'aboutir à la diversité et à la composition spécifique des bactéries et des champignons du sol, ce qui n'était pas possible avec les approches traditionnelles de microbiologie de cultures bactériennes (Bouchez *et al.*, 2016). Actuellement, un important effort de recherche est nécessaire pour connaître toutes les fonctions liées à ces groupes taxonomiques microbiens.

Ces analyses qui peuvent être réalisées par des laboratoires comme celui de Genosol à l'INRA de Dijon se démocratisent et sont en cours de transfert auprès de laboratoires de prestation d'analyses de sol comme Auréa (Projet PIA AgroEcoSol). L'objectif est de rendre accessible ces indicateurs aux utilisateurs des sols et de développer un diagnostic robuste de la qualité microbiologique des sols avec un prix abordable (<200€).

2.1.2 Indicateurs de cause

Des travaux comme ceux de Bender *et al.* (2016) ou de Petitjean *et al.* (2018) mettent en évidence l'implication de certaines pratiques comme l'insertion de prairies temporaires dans les rotations, le travail du sol, les quantités de fumier, de pesticides, etc. dans le déterminisme de la biodiversité du sol. Connaître ces pratiques permet alors de dériver des indicateurs de cause : quantité d'intrants, Indice de Fréquence de Traitement (IFT), pourcentage de la surface avec travail du sol réduit, etc.

2.1.3 Indicateurs prédictifs d'effet

Pour le compartiment sol, les nouvelles techniques de biologie moléculaire permettent d'acquérir des données sur l'abondance et la diversité des communautés microbiennes comme dans l'étude de Constancias *et al.* (2015). Ces auteurs ont cherché à relier les valeurs des communautés observées avec des variables potentiellement causales de milieu (texture du sol, pH, carbone organique), d'occupation du sol (forêt, prairies, cultures) et de pratiques (travail minimal du sol, binage). Cependant il n'est pas facile de dériver des modèles statistiques clairs et génériques qui pourraient servir à des indicateurs prédictifs utilisables dans d'autres contextes.

Dans l'état actuel, un module qualitatif sous forme « d'arbre satellite » évaluant l'effet sur la biomasse microbienne a été développé avec l'outil DEXi pour le modèle d'évaluation multicritère de la durabilité MASC2.0 (Craheix *et al.*, 2012). Il est composé de trois critères « effet des apports de matières organiques », « effet des pesticides » et « effet de la diversité des familles cultivées ». Par ailleurs, les modèles de la même famille DEXIPM, version 1 et 2 (Pelzer *et al.*, 2012 ; Demade, 2014), comprennent respectivement un module « ennemis naturels du sol » et pour le second un module « ennemis naturels rampants » (Denoirjean, 2018).

2.2 Pour les parcelles de prairie permanentes

2.2.1 Indicateurs d'effet mesurés

La bibliographie scientifique abonde en travaux sur la diversité floristique et faunistique appréhendée par les indicateurs classiques de richesse spécifique, d'indices de diversité taxonomique comme fonctionnelle. Pour calculer des indices de diversité composites (type Shannon, Simpson, Hill numbers), une information sur l'abondance relative est nécessaire. Celle-ci est à estimer par des comptages, des pesées ou encore une estimation visuelle du recouvrement de la flore (échelle de Braun-Blanquet, poignées, points-quadrats, ...) Dans le cadre du projet européen FP7 BIOBIO¹ (2009-2012), 4 indicateurs de richesse spécifique, respectivement pour les plantes vasculaires, vers de terre, pollinisateurs (abeilles et bourdons), et araignées ont été proposés. Ces taxons ont été sélectionnés selon un compromis entre pertinence écologique en lien avec les principaux services écosystémiques liés à l'agriculture, et faisabilité (facilité de capture, comptage et identification). Ces indicateurs ont été testés pour différents systèmes agricoles extensifs à intensifs, pour des systèmes de culture pérennes (olivier, vigne), de grande culture, des systèmes herbagers et mixtes et maraîchers de plein champ. Des protocoles sont maintenant disponibles.

2.2.2 Indicateurs de cause

De nombreux indicateurs de cause ont été proposés à partir des connaissances sur les liens entre pratiques de gestion des prairies et biodiversité des espèces. Dans le projet BIOBIO¹ 8 « indicateurs de gestion » - correspondant aux indicateurs de cause - ont été retenus (Tableau 1). Certains sont spécifiques aux prairies comme le chargement et l'intensité de pâture tandis que les autres peuvent être appliqués dans tous les autres systèmes. Quelques corrélations, en majorité négatives, ont été mises en évidence entre ces indicateurs de cause et les 4 indicateurs d'effet mesurés sur les exploitations de certains sites. Cependant, ces corrélations ont été observées principalement pour les plantes vasculaires, et dans l'ensemble pour une faible fréquence de sites ($\leq 50\%$).

Tableau 1 : Indicateurs de cause (de gestion) proposés par le projet FP7 BIOBIO (2009-2012)¹ et principales corrélations avec des indicateurs mesurés.

Indicateur	Calcul	Corrélation significative avec indicateurs mesurés (r- : négative, r+ : positive, 12 sites au total)
Apport (consommation) énergétique total direct et indirect	Estimation des consommations d'énergie avec la méthode DIALECTE*	r- avec la diversité de plantes vasculaires dans 6 cas, et 1 cas pour les autres taxons
Dépenses en intrants de production	Charges engrais, pesticides, fuel par ha	r- avec tous les indicateurs dans 2 cas (olive et polyculture élevage)
Zone d'utilisation d'engrais minéral azoté	Surface recevant des apports d'azote	r- avec la diversité de plantes vasculaires dans 5 cas r+ pollinisateur dans 1 cas
Apport d'azote	Calcul d'une balance azotée à la surface selon la méthode DIALECTE*	r- avec la diversité de plantes vasculaires et pollinisateurs dans 3 cas, r+ avec vers de terre dans 2 cas
Utilisation de pesticides	Nombre de traitements avec des pesticides	r- avec la diversité de plantes vasculaires dans 5 cas

¹ Développé par SOLAGRO (<http://www.erytage.fr/webplage/images/stories/pdf/fichedialecte.pdf>)

¹ Lien vers le site [BioBio](http://www.bioagro.fr)

2.2.3 Indicateurs prédictifs

Dans le cadre du projet FP7 Multisward (2010-2014), des indicateurs prédictifs sous forme de notes entre 0 et 10 ont été développés, évaluant l'effet de variables floristiques (p. ex. : nombre d'espèces, durée de floraison, etc.) et de gestion des prairies (p. ex. : régime de fauche) sur 7 groupes taxonomiques : la flore, l'abeille domestique, les bourdons, les papillons, les vers de terre, les araignées et les sauterelles (Plantureux *et al.*, 2014). Ces indicateurs ont été construits après établissement d'une base de connaissances sur les relations entre variables floristiques, variables de gestion et abondance et/ou diversité de ces groupes taxonomiques. Les variables ont été agrégées sous forme d'arbre de décision (associant la logique floue, méthode permettant d'éviter les effets de seuil). Ils ont été testés notamment sur un ensemble de 395 prairies françaises. Une étude de validation a permis de montrer des liens entre les notes des indicateurs, et des abondances ou diversité observées sur le terrain. Le calcul de ces indicateurs est disponible sur le site d'e-FLORA-sys².

Si les indicateurs dans le projet Multisward ont été construits à partir de l'expertise des concepteurs, ceux indicateurs du projet Casdar INDIBIO (2011-2014) ont été conçus à partir d'un jeu de données d'observation sur un réseau de prairies dans trois régions françaises bien différenciées en termes de conditions pédoclimatiques et de niveau d'intensification des prairies (Auvergne, Champagne-Lorraine, Normandie). Pour chaque région, des indicateurs sous forme de note entre 0 et 10 ont été construits pour 6 groupes taxonomiques à mobilité croissante : la flore, les vers de terre, les bourdons, les sauterelles, les chauves-souris et les oiseaux. Ce jeu de données a permis d'identifier les variables pertinentes de pratiques et paysagères (environnement proche des prairies) et d'attribuer des poids en termes de pourcentage de variance expliquée. Ces informations ont servi à la construction des arbres de décision (associant la logique floue) avec la méthode CONTRA (Bockstaller *et al.*, 2017) donnant une note entre 0 (défavorable) et 10 (favorable). Cette approche a permis de dériver des indicateurs reposant sur des données de terrain mais nécessiterait une validation dans d'autres situations.

2.3 Pour les parcelles cultivées

2.3.1 Indicateurs d'effet mesurés et indicateurs de cause

Dans l'ensemble, ces indicateurs reposent sur les mêmes taxons que ceux utilisés en prairies, comme proposé par le projet BIOBIO¹. En parcelle cultivée, la diversité floristique portera aussi sur les adventices.

2.3.2 Indicateurs prédictifs

Dans leur revue bibliographique, Bockstaller *et al.* (2011) avaient listé plusieurs approches françaises et étrangères mais concluaient qu'il y avait encore des manques pour ce type d'indicateurs. D'autres initiatives ont vu le jour entre temps, basées pour plusieurs sur l'outil DEXi qui permet une construction de modèles qualitatifs sous forme de d'arbres de décision.

Dans un travail récent, Denoirjean (2018) a comparé plusieurs modules évaluant la biodiversité, inclus dans des méthodes d'évaluation multicritère, MASC 2.0 (Craheix *et al.*, 2012) et DEXiPM dans sa version 1 et 2 (Pelzer *et al.*, 2012 ; Demade, 2014). Il les a mis en œuvre sur le dispositif des microfermes d'Arvalis à Boigneville (91) pour 3 années (2009-2011) et 4 systèmes de culture (raisonné « RAIS », intégré « INT »³, agriculture biologique « BIO » et en technique culturale simplifiée « MACH »). Comme montré dans le Tableau 2, MASC2 traite de groupes taxonomiques assez généraux, insectes volants (dont pollinisateurs), macrofaune du sol, flore et micro-organismes (cf. paragraphe 2.1.3). Les deux versions de DEXiPM se centrent sur les ennemis naturels et distinguent de manière explicite la flore adventice et la flore semi-naturelle (Tableau 2). Dans le cas de la version 2 de

² <http://eflorasys.univ-lorraine.fr/>

³ L'objectif du système de culture INT était d'avoir un IFT total deux fois inférieur au système RAIS

DEXiPM, l'arbre présente une complexité plus grande, notamment en tenant compte de manière plus précise des interactions entre groupes taxonomiques. Ces indicateurs prennent en compte des variables de pratiques (date de semis, travail du sol, fertilisation N et P, IFT quantité de substance active appliquée, nombre de fauches de la bordure, etc.) et de milieu (pourcentage habitat semi naturel dans la paysage, état des bords de champ, etc.). Il ressort du test que les méthodes DEXiPM évaluent de manière cohérente, avec le gradient d'intensification des 4 systèmes des microfermes, la biodiversité générale et celle des invertébrés. Pour la flore, et notamment les adventices, les indicateurs devront faire l'objet d'amélioration.

Tableau 2 : Comparaison de 3 indicateurs « biodiversité » et des sous-indicateurs pour les méthodes d'évaluation multicritère, MASC 2.0 DEXiPM version 1 et 2, quant à la cohérence avec le gradient d'intensification du dispositif microferme d'Arvalis à Boigneville.

	Indicateurs	MASC2	DEXiPM1	DEXiPM2
	Biodiversité générale	Ne reflète pas le gradient	Cohérence avec le gradient	
Insectes volants	Insectes volants	Regroupe les systèmes RAIS et INT		
	Ennemis nat. volants		Cohérence avec le gradient	
Faune du sol	Macrofaune du sol	Ne distingue que le système MACH ⁴		
	Ennemis nat. du sol		Cohérence avec le gradient	
	Ennemis nat. rampants			
Flore	Flore adventice		Cohérence avec le gradient	Gradient incohérent
	Flore naturelle/ semi-naturelle	Ne distingue que le système BIO		
Micro-organismes	Micro-organismes du sol	Ne distingue que le système BIO		

Dans le cadre du projet Casdar Auximore (Wartelle *et al.*, 2017), l'outil DEXi a aussi été utilisé pour construire des modèles qualitatifs prédisant le potentiel d'abondance de taxons particuliers d'auxiliaires des cultures en fonction des caractéristiques du paysage et des pratiques agricoles : DEXi-Syrphes, DEXi-Coccinelles, DEXi-Chrysopes, DEXi-ParasitoïdesDePucerons. DEXi-Syrphes a aussi été testé par Denoirjean (2018) sur les microfermes de Boigneville et a permis de distinguer deux groupes : d'une part les systèmes intensifs RAIS et MACH, et de l'autre les systèmes moins intensifs INT et BIO. Ceci est cohérent mais manque de sensibilité.

Un autre type d'indicateurs prédictifs et quantitatifs basés sur des mesures recueillies sur le terrain à la parcelle a été développé via le recours à des méthodes de fouille de données. A titre d'exemple, le prototype d'indicateur « Icarab » (Rouabah *et al.*, 2017), a pour objectif de prédire la présence de carabes, selon leurs caractéristiques fonctionnelles liées à la prédation (taille corporelle, préférences alimentaires) en fonction des pratiques agricoles et de caractéristiques du paysage. Il a été créé à partir d'un jeu de données issu du projet Casdar Entomophages, portant sur les abondances de carabes par espèce dans deux régions françaises, Picardie et Région Centre, sur les pratiques agricoles (travail du sol, pesticides, etc., extraites de la base de données Systerre d'Arvalis) et les caractéristiques paysagères répertoriées sur un rayon d'1 km autour des parcelles. L'indicateur Icarab se présente actuellement sous la forme d'un tableur Excel facilement mobilisable par un utilisateur non spécialiste (Tableau 3).

⁴ Signifie que d'après l'évaluation les trois autres systèmes (RAIS, INT et BIO) ont des effets équivalents sur la biodiversité

Tableau 3: Exemples de résultats fournis par l'indicateur Icarab. En rouge, figurent les valeurs les plus faibles, considérées a priori défavorables pour l'agriculteur.

	Valeur de référence : parcelle Picardie	Simulation 1 : >41% céréales	Simulation 2 : >37% zones semi-nat.	Simulation 3 : >1,7 hétérogénéité paysagère
Diversité carabes	9,85	6,92	9,85	9,85
Abondance totale sans <i>Pterostichus melanarius</i>	417	155	417	417
Abondance gros carabes (L>13,4 mm)	203	203	48,2	48,2
Abondance gros carabes sans <i>Pterostichus melanarius</i>	23,1	23,1	64,9	64,9
Abondance moyens carabes (9mm<L<13,4mm)	143	3320	143	143
Abondance moyens carabes sans <i>Poecilus cupreus</i>	11,9	11,9	11,9	11,9
Abondance petits carabes (L<9mm)	332	33,2	332	332
Abondance <i>Pterostichus melanarius</i>	43,1	43,1	43,1	43,1

Pour la flore semi-naturelle des bords de champ, Ricou (2014) a développé un calculateur Excel avec deux indicateurs. Le premier est basé sur un modèle opérationnel prédisant des probabilités de présence d'espèces végétales en fonction des pratiques (nombre de broyages, dérive de fertilisation et d'herbicides de la parcelle, etc.), et du milieu (potentiel de minéralisation, profondeur de sol, etc.). Des fonctions pour certaines reposant sur des arbres de décision (associant la logique floue) estiment ces probabilités de présence pour une base de données de plus de 300 espèces. La valeur finale de l'indicateur est basée sur le minimum des probabilités de présence selon la loi des facteurs limitants. Le second indicateur est basé sur les espèces végétales présentes, pour prédire leur valeur pollinisatrice à partir de l'attraction visuelle, l'accessibilité et la récompense florale.

Pour aller plus loin, dans des approches quantitatives, le modèle mécaniste FLORSYS développé à l'INRA de Dijon permet de prédire la densité d'adventices et de calculer des indicateurs de biodiversité (par ex. offre trophique pour pollinisateurs à partir des travaux de Ricou (2014) et de Mézière *et al.* (2015)). Cependant, la mise en œuvre du modèle n'est possible qu'avec les chercheurs qui ont développé l'outil. Dans le cadre du projet ANR COSAC⁵ qui vient de se terminer, un métamodèle plus opérationnel a été développé pour la conception de systèmes de culture innovants (Colas *et al.*, 2019).

2.4 Au niveau de l'exploitation agricole et du territoire

Dans cette partie nous traiterons des indicateurs utilisables à un niveau d'organisation supérieur à la parcelle, sur le parcellaire de l'exploitation ou d'un territoire donné.

2.4.1 Indicateurs d'effet mesurés

Les indicateurs du projet BIOBIO¹ portant sur 4 groupes taxonomiques (cf. paragraphe 2.2.1) peuvent être utilisés à l'échelle de l'exploitation ou d'un territoire à partir d'un échantillonnage adapté. Aux niveaux national et européens, l'indicateur STOC (suivi temporel des oiseaux communs) fait l'objet d'une mise en œuvre depuis 1989 dans le cadre d'un réseau de 1000 observateurs et constituait

⁵ <https://www.projet-cosac.fr/>

jusqu'à maintenant le seul indicateur disponible pour le suivi pluriannuel de la biodiversité. La décomposition en groupes fonctionnels (généralistes, spécialisés des milieux agricoles, forestiers et urbains) révèle des tendances contrastées et un déclin alarmant notamment pour les espèces des milieux agricoles.

Plus récemment, l'Observatoire Agricole de la Biodiversité (OAB) mis en place depuis 2009 par le Ministère de l'Agriculture et piloté par le Muséum National d'Histoire Naturelle suit des indicateurs basés sur des protocoles simplifiés de relevés de terrain, vers de terre (abondance par relevé en parcelle), invertébrés terrestres (abondance et diversité sous plaque), pollinisateurs sauvages (abondance en nichoirs) et papillons (abondance et diversité sur transects). Les premiers résultats confirment l'effet positif de l'agriculture biologique, l'effet négatif du labour profond sur l'abondance des vers de terre mais pas l'effet positif de l'hétérogénéité du paysage. Par ailleurs il ressort une diminution de l'abondance d'abeilles solitaires et une augmentation de l'abondance des vers de terre et plus généralement des invertébrés décomposeurs du sol. Ces résultats doivent faire l'objet d'un traitement approfondi en raison de possibles biais liés à l'échantillonnage et notamment au fort renouvellement de parcelles (Royal, 2018).

2.4.2 Indicateurs de cause

Les indicateurs d'habitat du projet BIOBIO¹ reflètent encore une fois ce qui est disponible avec 8 indicateurs dont : richesse des habitats (nombre d'habitats différents), diversité des habitats (indice de Shannon), taille des parcelles (surface divisée par nombre d'ilots), habitats linéaires (en m/ha), richesse des cultures (nombre divisé par surface de l'exploitation), habitat sous forme d'arbustes (proportion en termes de surface), habitat sous forme d'arbres (proportion en termes de surface), habitats semi-naturels (proportion en termes de surface par relevés de terrain et cartographie).

La méthode BIOTEX développée par Manneville *et al.* (2014) consiste en une évaluation de 5 critères avec au total une trentaine d'indicateurs : mosaïque paysagère (5 indicateurs), structure et composantes paysagères (9), gestion des infrastructures agro écologiques (6), gestion des cultures (8), gestion des prairies permanentes (3). La méthode a été conçue pour être mise en œuvre en 1 journée dont ½ journée sur l'exploitation. L'indicateur « valeur écologique des prairies permanentes » capitalise l'expertise des auteurs sur prairies sous la forme d'un arbre de décision DEXi prenant en compte le mode d'exploitation, l'intensité de défoliation et la fertilisation azotée. Un arbre DEXi permet d'avoir une valeur agrégée de l'ensemble des indicateurs.

Pour les indicateurs paysagers, la méthode propose des indicateurs de répartition et de connectivité. Elle fournit une méthode de calcul opérationnel de ces indicateurs à partir de relevés sur GoogleEarth, accessible à tous, via un comptage à hauteur normée de 5000 m sur un quadrillage à pixel de 6 ha de côté. Cette approche est plus opérationnelle que celle de BIOBIO¹. Pour faciliter la mise en œuvre des indicateurs, des travaux explorent les possibilités de la télédétection liées aux progrès technologiques (Sausse *et al.* (2018), Encadré 1).

2.4.3 Indicateurs prédictifs

Peu de méthodes sont disponibles à ce niveau. L'outil de diagnostic de l'Impact des pratiques agricoles sur la Biodiversité de l'Exploitation Agricole « IBEA⁶ » se présente sous forme d'un arbre DEXi et évalue l'impact sur la biodiversité domestique à partir de 4 indicateurs de base mis en classe (diversité génétique végétale et animale, espèces, race ou variété patrimoniale) et l'impact sur la biodiversité sauvage à partir de 29 indicateurs (p. ex. pression herbicides totaux, nombre de fauche, pression produits vétérinaires, qualité des milieux herbacés non productifs, etc.). Cet arbre construit par expertise ne différencie donc pas de groupes taxonomiques. L'outil a pour vocation d'être un vecteur de

⁶ <http://ibea.portea.fr/indicator/index.php?r=site/genPage&id=70>

sensibilisation dans les formations initiales et continue des agriculteurs, de promotion d'actions favorables à la biodiversité et de dialogue sur cette thématique.

Au niveau de l'exploitation agricole, le système expert SALCA-biodiversité (Jeanneret *et al.*, 2014) développé à Agroscope Zurich dans le cadre de l'analyse de cycle de vie (ACV) évalue l'effet des pratiques agricoles sur 17 indicateurs issus de 10 groupes taxonomiques : plantes vasculaires, oiseaux, petits mammifères, amphibiens, mollusques, araignées, carabes, papillons, pollinisateurs sauvages, sauterelles. Pour certains, des groupes particuliers ont été distingués (p. ex. espèces liste rouge). La méthode repose sur une notation de l'effet des pratiques à partir d'une large revue bibliographique. Bien que destinée à l'ACV, la méthode peut s'appliquer pour un contexte hors ACV, car elle ne couvre que l'exploitation agricole.

Encadré 1 : Les possibilités de la télédétection pour le calcul d'indicateurs paysagers (Sausse *et al.*, 2018)

Le calcul d'indicateurs paysagers résulte d'une chaîne de traitements incluant la production d'une carte à partir d'images satellites ou aériennes, puis le traitement de cette carte (Figure 1). Il est aujourd'hui facile de se procurer des images ou des cartes prêtes à l'emploi, par exemple via le programme européen de surveillance Copernicus et les valorisations associées. La gratuité de ses images Sentinel 2 rend ainsi accessible à tous une carte nationale d'occupation des sols actualisée chaque année⁷. Le calcul d'indicateurs paysagers est possible grâce à des logiciels autonomes (p. ex. : FRAGSTATS) ou des extensions de logiciels SIG (e.g. LecoS sur QGIS). Les indicateurs sont simples ou complexes et disponibles en grand nombre. Les choix techniques (résolution des images, définition des classes/habitats, indicateurs...) dépendent d'hypothèses écologiques (un chevreuil ne perçoit pas le paysage comme un carabe ni comme un bleuets ...).

La relative technicité des chaînes de traitement rend encore difficile l'appropriation en routine de ces méthodes par les acteurs du développement agricole. L'utilisation de requête par API d'indicateurs paysagers sur des cartes en licence ouverte permettrait en principe une large utilisation, à condition que des opérateurs s'investissent sur ce chantier. Mais ces facilités techniques ne se substitueront pas à la nécessaire réflexion sur le choix des indicateurs et leur interprétation.



Figure 1 : Chaîne de traitement de l'image aux indicateurs paysagers

2.5 Pour l'analyse de cycle de vie

L'analyse du cycle de vie permet d'évaluer les impacts environnementaux d'un système de production agricole en y incluant les impacts associés aux intrants utilisés par ce système tels que les aliments du bétail importés sur la ferme. Puisque les matières premières constituant ces aliments peuvent être nombreuses et venir de loin, l'évaluation des impacts sur la biodiversité dans le cadre de l'analyse du cycle de vie repose nécessairement sur des indicateurs nécessitant peu de données d'entrée et qui sont facilement disponibles pour les différentes régions du monde (Winter *et al.*, 2017). Les indicateurs utilisés en analyse du cycle de vie estiment dans la plupart des cas l'impact sur la diversité des espèces à travers une typologie de modes d'utilisation des terres, ce qui permet de distinguer de façon grossière des types d'utilisations des terres d'intensités différentes. Par ailleurs l'effet d'autres pressions sur la biodiversité tels que le changement climatique, l'eutrophisation, l'écotoxicité est également pris en compte dans certains indicateurs biodiversité proposés dans le cadre de l'analyse du cycle de vie.

⁷ <http://osr-cesbio.ups-tlse.fr/~oso/>

Discussion et conclusions

Cette revue à la suite de celle de Bockstaller *et al.* (2011) met en évidence qu'il existe de nombreux indicateurs de biodiversité de cause (indirects) et d'effets mesurés (directs). Des listes cohérentes d'indicateurs comme dans le cadre de méthode telles que BIOBIO ou encore BIOTEX ont été proposées. Les indicateurs de cause liés aux pratiques sont assez faciles à appréhender par les non spécialistes, tandis que les indicateurs d'habitats et paysagers demandent un investissement plus lourd bien qu'il existe une méthode opérationnelle semi quantitative de calcul (cf. méthode BIOTEX). L'avenir sera probablement à la télédétection, bien qu'il reste encore des améliorations à apporter. Dans tous les cas, la télédétection devra toujours être couplée avec des observations et vérifications ponctuelles sur le terrain. La corrélation des indicateurs de cause basés sur les pratiques avec des indicateurs mesurés reste faible (cf. Tableau 1, voir aussi Denoirjean, 2018). Les indicateurs de cause permettent de donner une première information pour sensibiliser et ou pour donner des pistes d'explication des résultats obtenus avec les indicateurs d'effet mesurés. Ceux-ci donnent une image assez exacte de la réalité en termes de diversité, d'abondance pour le groupe taxonomique donné si l'échantillonnage et l'identification des espèces sont maîtrisés. Leur utilisation se justifie pour évaluer l'impact des pratiques sur tel ou tel taxon, mais leur capacité à rendre compte de l'ensemble de la biodiversité fait l'objet de nombreux débats (Bockstaller *et al.*, 2011). Par ailleurs, ils nécessitent des compétences d'identification des espèces qui rendent ces méthodes difficiles à mettre en œuvre pour le non-spécialiste. Certains ont proposé des approches d'identification simplifiée reposant sur des groupes morphologiques mais celles-ci restent discutées au niveau scientifique (Duelli et Obrist, 2003).

S'il existe des manques, c'est bien au niveau des indicateurs d'effet prédictifs, pour lesquels plusieurs indicateurs reposent sur l'outil qualitatif DEXi, notamment en grandes cultures, faute de connaissances quantitatives suffisantes pour modéliser les effets des pratiques sur la biodiversité. Ces indicateurs ont souvent été développés dans des projets de conception de systèmes innovants pour améliorer la durabilité (MASC) ou réduire l'usage des pesticides (DEXiPM). L'outil DEXi ne fait ici pas appel à la logique floue et peut donc présenter des effets de seuil, c.-à-d. des variations brutales du résultat, liées aux changements de classe. En revanche, il est accessible et assez convivial. Enfin, en ACV, l'existence d'un certain nombre de méthodes d'évaluation est à noter avec certaines spécificités, comme le système expert SALCA, aussi utilisables en dehors de l'ACV.

En conclusion, le choix existe dans de nombreux cas mais il manque cependant encore des travaux de comparaison et de validation comme celui fait dans le domaine des indicateurs pesticides avec un jeu de données solides de terrain (Pierlot *et al.*, 2017). Par ailleurs, la question des valeurs de référence pour ces indicateurs nécessite encore des investigations. Ainsi dans de nombreux cas, ces indicateurs ne peuvent être utilisés que dans des comparaisons de système. Enfin à partir d'une revue plus systématique, il pourrait être intéressant de construire un outil d'aide au choix d'indicateurs à l'instar de ce qui a été fait par le RMT Erytage⁸ pour les méthodes d'évaluation multicritère et les indicateurs pesticides (Keichinger *et al.*, 2013) ou encore dans Lairez *et al.* (2015).

Remerciements : Les auteurs remercient le GIS « Grande Culture à Hautes Performances Économiques et Environnementales » (GC-HP2E <https://www.gchp2e.fr/>) pour le financement du stage de fin d'étude de Thomas Denoirjean en 2018.

Références bibliographiques

Bender S.F., Wagg C., van der Heijden M.G.A., 2016. An Underground Revolution: Biodiversity and Soil Ecological Engineering for Agricultural Sustainability. *Trends in Ecology and Evolution* 31, 440–452.

⁸ <http://www.erytage.fr/webplage/>

- Bockstaller C., Beauchet S., Manneville V., Amiaud B., Botreau R., 2017. A tool to design fuzzy decision trees for sustainability assessment. *Environmental Modelling and Software* 97, 130–144.
- Bockstaller C., Lassere-Joulin F., Slezack-Deschaumes S., Piutti S., Villerd J., Amiaud B., Plantureux S., 2011. Assessing biodiversity in arable farmland by means of indicators: an overview. *Oléagineux Corps gras Lipides* 18, 137–144.
- Bouchez T., Bliex A.L., Dequiedt S., Domaizon I., Dufresne A., Ferreira S., Godon, *et al.*, 2016. Molecular microbiology methods for environmental diagnosis. *Environmental Chemistry Letters* 14, 423–441.
- Campbell B.M., Beare D.J., Bennett E.M., Hall-Spencer J.M., Ingram J.S.I., Jaramillo F., Ortiz R., *et al.*, 2017. Agriculture production as a major driver of the Earth system exceeding planetary boundaries. *Ecology and Society*. 22.
- Ceballos G., Ehrlich P.R., Dirzo R., 2017. Biological annihilation via the ongoing sixth mass extinction signaled by vertebrate population losses and declines. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America* 114, E6089–E6096.
- Chao A., Chiu C.-H., Jost L., 2014. Unifying Species Diversity, Phylogenetic Diversity, Functional Diversity, and Related Similarity and Differentiation Measures Through Hill Numbers. *Annual Review of Ecology, Evolution, and Systematics* 45, 297–324.
- Colas F., Queyrel W., Van Inghelandt B., Villerd J., Colbach N., 2019. Comment conseillers et agriculteurs contribuent au développement d'un modèle d'aide à la décision pour la gestion agroécologique de la flore adventice ? In: Actes du séminaire final du projet COSAC 31 Janvier-1 Février 2019. pp. 87–89.
- Constancias F., Terrat S., Saby N.P.A., Horrigue W., Villerd J., Guillemin J.-P., Biju-Duval L., *et al.*, 2015. Mapping and determinism of soil microbial community distribution across an agricultural landscape. *Microbiology open* 4, 505–517.
- Craheix D., Angevin F., Bergez J.E., Bockstaller C., Colomb B., Guichard L., Reau R., Doré T., 2012. MASC 2.0, un outil d'évaluation multicritère pour estimer la contribution des systèmes de culture au développement durable. *Innovations Agronomiques* 20, 35-48.
- Demade M., 2014. How to assess biodiversity and ecosystem services in arable cropping systems using the multi-attribute model DEXiPM. Mémoire de fin d'étude, AgroParisTech, Paris 88 p.
- Denoirjean T., 2018. Intégration d'indicateurs évaluant les performances des systèmes agricoles sur la biodiversité et les services écosystémiques à l'outil Systerre ®. Mémoire de fin d'étude, VetAgroSup Clermont, 145 p.
- Diaz S., Fargione J., Chapin F.S., Tilman D., 2006. Biodiversity loss threatens human well-being. *Plos Biology* 4, 1300–1305.
- Duelli P., Obrist M.K., 2003. Biodiversity indicators: the choice of values and measures. *Agriculture Ecosystems and Environment* 98, 87–98.
- Henneron L., Bernard L., Hedde M., Pelosi C., Villenave C., Chenu C., Bertrand M., *et al.*, 2015. Fourteen years of evidence for positive effects of conservation agriculture and organic farming on soil life. *Agronomy for Sustainable Development* 35, 169–181.
- Jeanneret P., Baumgartner D.U., Knuchel Freiermuth R., Koch B., Gaillard G., 2014. An expert system for integrating biodiversity into agricultural life-cycle assessment. *Ecological Indicators* 46, 224–231.
- Keichinger O., Benoit P., Boivin A., Bourrain X., Briand O., Chabert A., Domange N., *et al.*, 2013. GUIDE : développement d'un outil d'aide à la sélection d'indicateurs de risques liés à la présence des produits phytopharmaceutiques dans les milieux aquatiques - Mise au point, applications et perspectives. *Innovations Agronomiques* 28, 1–13
- Lairez J., Feschet P., Aubin J., Bockstaller C., Bouvarel I., 2015. Evaluer la durabilité en agriculture - Guide pour l'analyse multicritère en productions animales et végétales. Editions Quae., Versailles, France.
- Le Roux X., Barbault R., Baudry J., Burel F., Doussan I., Garnier E., Herzog F., *et al.*, 2008. Agriculture et biodiversité. Valoriser les synergies. 113 p.
- Magurran A.E., 2004. Measuring biological diversity. Blackwell Science, Oxford (UK).

Manneville V., Chancéaume A., Amiaud B., 2014. BIOTEX : une démarche d'évaluation multicritère de la biodiversité ordinaire dans les systèmes d'exploitation d'élevage et de polyculture-élevage. Institut de l'Élevage (IDELE), Paris (France). Paris, 59 p.

Mézière D., Colbach N., Dessaint F., Granger S., 2015. Which cropping systems to reconcile weed-related biodiversity and crop production in arable crops? An approach with simulation-based indicators. *European Journal of Agronomy* 68, 22–37.

Pelzer E., Fortino G., Bockstaller C., Angevin F., Lamine C., Moonen C., Vasileiadis V., 2012. Assessing Innovative Cropping Systems with DEXiPM, a Qualitative Multi-Criteria Assessment Tool Derived from DEXi". *Ecological Indicators* 18: 171-82.

Petitjean C., Amiaud B., Charrier X., De Vliegheer A., Gastal F., Houot S., Manneville V., *et al.*, 2018. Systèmes de polyculture-élevage : quels effets des pratiques agricoles sur les teneurs en matières organiques et le fonctionnement microbien du sol ? *Fourrages* 238, 239–247.

Pierlot F., Marks Perreau J., Réal B., Constant T., Lioeddine A., Carluer N., Van Dijk P., *et al.*, 2017. Predictive quality of 26 pesticide risk indicators: a multisite assessment for water contamination. *Science of The Total Environment* 605, 655–665.

Plantureux S., Dumont B., Rossignol N., Taugourdeau S., Huguenin-Elie O., 2014. An indicator-based tool to assess environmental impacts of multi-specific swards. *Grassland Science in Europe* 19, 756–758.

Ricou C., 2014. Conception d'un indicateur prédictif évaluant les effets des pratiques agricoles sur la diversité floristique et ses services en grandes cultures à l'échelle de la bordure de champ. Univ. Lorraine. UMR Université de Lorraine - INRA 1121, Nancy.

Rouabah A., Lasserre-Joulin F., Villerd J., Serradj-Noirtin B., Meiss H., Wartelle R., Maillet-Mezeray J., 2017 Comment la fouille de données peut renouveler la démarche de construction des indicateurs agro-environnementaux ? Exemple de l'indicateur Icarab. 47e congrès du Groupe Français des Pesticides, 15-18 mai 2017, (Nancy), 1-6.

Royal C., 2018. Suivi de la biodiversité ordinaire en milieu agricole - Valorisation des données de l'Observatoire Agricole de la Biodiversité. Mémoire fin d'étude, AgroSup Dijon, 113 p.

Sánchez-Bayo F., Wyckhuys K.A.G., 2019. Worldwide decline of the entomofauna: A review of its drivers. *Biological Conservation* 232, 8–27.

Sausse C., Cheret V., Coffion R., Ducrot D., Duthoit S., Gross H., Lepennetier A., *et al.* 2018. La télédétection des infrastructures agrocologiques : de la promesse aux méthodes opérationnelles (TÉL-IAE). *Innovations Agronomiques* 63, 267–278.

Wartelle R., Gross H., Arnault I., Robert, C., Tosser V., Preud'Homme R.-L., Chabert A. *et al.*, 2017. Auximore : optimiser le contrôle biologique des bio-agresseurs en systèmes de grandes cultures. *Innovations Agronomiques* 55, 1–11.

Winter L., Lehmann A., Finogenova N., Finkbeiner M., 2017. Including biodiversity in life cycle assessment – State of the art, gaps and research needs. *Environmental Impact Assessment Review* 67: 88-100.

Cet article est publié sous la licence Creative Commons (CC BY-NC-ND 3.0).



<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/3.0/fr/>

Pour la citation et la reproduction de cet article, mentionner obligatoirement le titre de l'article, le nom de tous les auteurs, la mention de sa publication dans la revue « *Innovations Agronomiques* », la date de sa publication, et son URL ou DOI).