



ARTICLE

Un indicateur évaluant la diversité globale des rotations : de la diversité des cultures aux services écosystémiques

Olivier Keichinger¹, Loïc Viguière^{2,3}, Guénaëlle Corre-Hellou³, Antoine Messean²,
Frédérique Angevin⁴ et Christian Bockstaller¹

⁽¹⁾ Université de Lorraine, INRAE, LAE, F-68000 Colmar, France

⁽²⁾ INRAE, Eco-Innov, F-78850 Thiverval-Grignon, France

⁽³⁾ École Supérieure d'Agriculture (ESA), INRAE, LEVA, F-49007 Angers, France

⁽⁴⁾ INRAE, SOLS, F-45075 Orléans, France

Résumé

La diversification (allongement des rotations, introduction de cultures intermédiaires, cultures relais, associations...) est un des leviers majeurs pour une transition agroécologique des systèmes de culture. Cependant, toute diversification n'est pas bonne en soi car ses performances dépendent des cultures introduites et de la manière de les assembler. Pour aider les acteurs à orienter leur choix de configuration des systèmes de culture, nous avons développé un indicateur de diversité globale des cultures de la rotation (I-DGC) basé sur une construction en arbre hiérarchique. Celui-ci comprend une évaluation des diversités temporelle et spatiale. La diversité temporelle est ensuite décomposée en un indicateur de diversité taxonomique et un de diversité fonctionnelle, celle-ci étant liée à la fourniture de douze services écosystémiques (SE). L'indicateur global calculé à partir des données sur les cultures permet d'estimer a priori, l'effet potentiel de la diversification d'une rotation. L'estimation des douze SE sur un ensemble de rotations typiques des agroécosystèmes montre des variations importantes. Par ailleurs, l'allongement de la rotation et l'augmentation du nombre de cultures ne sont pas suffisants ; ils doivent être associés à un choix adéquat des cultures et de leur succession.

Mots clés : transition agroécologique, diversification, diversité spatio-temporelle, succession cultures, association de culture, cultures en bandes

Abstract

Diversification (lengthening of rotations, introduction of catch and cover crops, relay cropping, associations...) is one of the major levers for an agroecological transition of cropping systems. However, any diversification is not good in itself, its performance depending on the crops introduced and their sequence. To contribute to this, we have developed an indicator of global crop diversity in the rotation (I-DGC) based on a hierarchical tree construction. It includes an assessment of temporal and spatial diversity. The temporal diversity is then decomposed into a taxonomic diversity indicator and a functional diversity indicator which is linked to the provision of twelve ecosystem services (ES). The global indicator calculated from the crop data allows the evaluation of the effect of diversification of a rotation or the comparison of several rotations. The evaluation of the twelve ES on a set of different rotations shows that lengthening the rotation and increasing the number of crops are not sufficient and that they must be combined with an adequate choice of crops.

Key words: agro-ecological transition, diversification, spatial-temporal diversity, crop sequence, intercropping, strip cropping

Introduction

La révolution agricole de l'après-guerre a conduit à une intensification et une spécialisation importante de l'agriculture française, grâce au développement de la mécanisation et des intrants industriels (engrais, pesticides) et naturels (eau d'irrigation). La structuration concomitante des filières agro-industrielles a par ailleurs favorisé une spécialisation régionale des productions agricoles pour mieux garantir la quantité et la qualité des approvisionnements. Cette spécialisation s'est accompagnée d'une réduction du nombre d'espèces cultivées et d'un raccourcissement des rotations, l'efficacité croissante des produits phytosanitaires permettant d'atténuer les effets agronomiques négatifs des rotations courtes ou des assolements simplifiés (Meynard *et al.*, 2013). Cette intensification a généré des effets environnementaux négatifs comme la contamination des masses d'eau par les nitrates ou les substances actives, la destruction d'habitats naturels et donc la diminution de la biodiversité et des services rendus par les écosystèmes. Pour y remédier, une voie majeure est une reconception des systèmes agricoles, basée sur les principes de l'agroécologie et conduisant à une intensification écologique (Bommarco *et al.*, 2013). Cette transition repose sur une substitution des intrants chimiques par les services écosystémiques, i.e., des processus écologiques ou des éléments de la structure de l'écosystème dont l'Homme dérive des avantages (Bommarco *et al.*, 2013; Tamburini *et al.*, 2020; Tibi & Therond, 2017) dans l'objectif de réduire les effets néfastes constatés tout en maintenant une production acceptable (Félix, 2015 ; Zampieri *et al.*, 2020). Les objectifs sont multiples : réduction des pressions de bio-agresseurs, résilience vis-à-vis du changement climatique, préservation des ressources, autonomie protéique et bouclage des cycles de l'azote et du phosphore, etc. (Kremen & Miles, 2012; Meynard *et al.*, 2013).

Un des leviers est la diversification des systèmes de production agricole. Or la diversification de la rotation était déjà central dans les travaux sur la production intégrée dans les années 90 (El Titi *et al.*, 1993 ; Viaux, 1999). Elle est considérée comme un levier essentiel pour la transition écologique et semble être la pratique sur laquelle les agriculteurs sont prêts à faire des efforts car facile à mettre en œuvre (Kleijn *et al.*, 2019). Cette diversification passe par des aspects temporels (allongement des rotations et donc du nombre de cultures de vente, par la conduite de plusieurs cultures de vente par année ou bien encore par les intercultures et les cultures en relais (Hufnagel *et al.*, 2020) mais aussi spatial au sein de la parcelle (associations de variétés ou d'espèces, cultures en bande, agroforesterie) (Fahrig *et al.*, 2015 ; Sirami *et al.*, 2019) ou extra parcellaire (échanges grande culture – élevage à l'échelle de territoires). Ce changement de pratiques aura aussi indirectement un effet sur l'assolement, celle-ci étant une conséquence de la rotation. D'autres leviers portant sur les surfaces non productives peuvent aussi être mobilisés comme le semis de bandes fleuries, et implantation d'autres infrastructures agroécologiques. Dans ce travail nous nous focaliserons sur les surfaces productives avec des cultures de vente.

Cependant Meynard *et al.* (2013) ont identifié certains freins à la diversification (fonctionnement global du système agro-industriel, développement des filières, etc.). Pour pallier ces obstacles, la PAC a introduit une première mesure de diversification basée sur le simple nombre de cultures en mettant peu de contrainte sur la proportion et le type de culture. Pour accompagner cette diversification des cultures via la rotation, il est important de pouvoir évaluer, à priori et de façon didactique, les effets induits par les changements opérés sur la durabilité du système de culture et notamment les performances environnementales. Or, les auteurs se limitent souvent au nombre de cultures (Uthes *et al.*, 2020) ou à des indices de diversité comme Shannon (Fahrig *et al.*, 2015; Uthes *et al.*, 2020) ou l'inverse de Simpson (Iocola *et al.*, 2020) pour évaluer cette diversification. Ce sont des indicateurs de cause selon la typologie de Bockstaller *et al.* (Christian Bockstaller *et al.*, 2015) ne traitant pas directement des effets environnementaux comme la biodiversité, par exemple. Ils ne permettent pas de comprendre le rôle de cette diversification dans le fonctionnement de l'agroécosystème et, en particulier, sur les services écosystémiques rendus ou sur les impacts.

Le but de cet article est de présenter une méthode qui permette de rendre compte de l'effet de la diversification des cultures de la rotation¹ sur l'agroécosystème. Évaluer la durabilité de nouvelles pratiques peut nécessiter un grand nombre de variables pédoclimatiques ou issues de l'itinéraire technique (fertilisation, produits phytopharmaceutiques, passage d'outils, ...). Pour cet indicateur, le choix s'est porté sur les données concernant la configuration spatio-temporelle des cultures : l'ordre de succession des cultures et l'agencement spatial au niveau de la parcelle (association, culture en bande). L'indicateur traitera de différentes dimensions de la diversité, spatiale et temporelle, taxonomique et fonctionnelle (au travers de 12 services écosystémiques), en prenant en compte les cultures, les associations de culture et les cultures intermédiaires. L'article présentera le mode de calcul de l'indicateur et de ses composantes, suivi d'exemples d'application sur une large gamme de rotations.

Présentation de l'Indicateur de Diversité Globale des Cultures (I-DGC)

L'I-DGC a été conçu sous forme d'arbre hiérarchique afin de pouvoir prendre en compte les différents types de diversité. Ceci permet une évaluation de ces aspects avec des sous-indicateurs plus ou moins agrégés (Figure 1). L'évaluation indépendante de chaque SE, le calcul d'indicateurs à différents niveaux (temporel et spatial) avant une agrégation globale, permet en effet une comparaison plus fine des rotations entre elles par une meilleure compréhension du résultat agrégé obtenu.

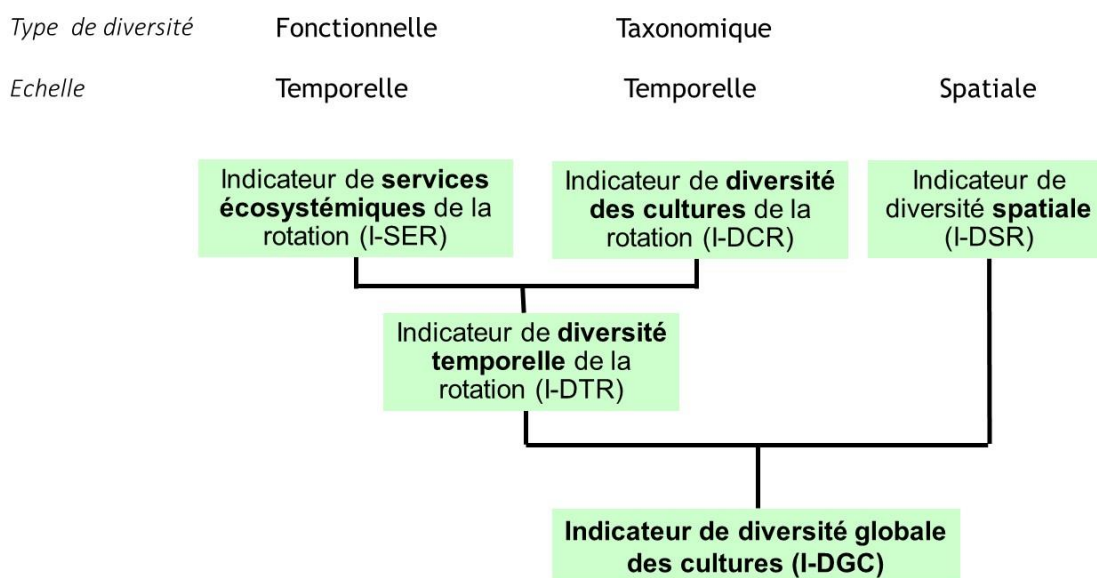


Figure 1 : Structure générale de l'indicateur de diversité globale des cultures I-DGC

À un premier niveau, deux indicateurs traitent de la diversité temporelle liée à la rotation, dans ses composantes fonctionnelle et taxonomique. La première est abordée sous l'angle des services écosystémiques permis par les traits fonctionnels des cultures et de leurs interactions dans la rotation (Gaba *et al.*, 2014 ; Therond et Duru, 2019). Le second indicateur traite de la diversité taxonomique et fournit une information complémentaire. De nombreux auteurs ont montré qu'une rotation diversifiée pouvait avoir un effet sur la diversité de différents groupes taxonomiques (micro-organismes du sol, invertébrés et vertébrés) (Fahrig *et al.*, 2011 ; Sirami *et al.*, 2019 ; Zhang *et al.*, 2020). Par ailleurs, l'exemple emblématique de la rotation à deux cultures (maïs/soja) confirme l'intérêt de cette approche. En effet, cette rotation permet la fourniture d'un certain nombre de services écosystémiques améliorant la productivité du système par rapport aux monocultures respectives (Pikul *et al.*, 2005) mais a conduit à la sélection de souche de chrysomèles

¹ Par la suite nous utiliserons le terme de rotation mais l'indicateur peut se calculer sur une succession de culture non cyclique de durée déterminée.

« résistantes à la rotation de 2 ans ». Une diversité taxonomique supérieure vient améliorer la durabilité du système (Davis *et al.*, 2012).

À un second niveau, la diversité temporelle (rotation) est agrégée avec la diversité spatiale ou biodiversité associée liée à la répartition des cultures (assolement) (Fahrig *et al.*, 2011 ; Martin *et al.*, 2020 ; Sirami *et al.*, 2019 ; Therond & Duru, 2019 ; Uthes *et al.*, 2020).

Dans notre cas, on se limite aux parcelles avec des rotations ayant au moins une culture de vente annuellement, le but étant de voir en quoi une rotation plus ou moins longue peu apporter en termes de biodiversité. Donc les couverts non gérés par les agriculteurs, aussi appelés couverts semi-naturels, ne sont pas pris en compte ici, même si leur effet sur la biodiversité est connu (Fahrig *et al.*, 2011 ; Sirami *et al.*, 2019). Il en est de même de couverts particuliers qui ne rentrent pas dans la rotation, comme des rangées d'arbres ou des bandes fleuries.

Indicateur de services écosystémiques (I-SER)

Les services écosystémiques (SE) pris en compte

Après une revue bibliographique, 12 SE ont été retenus comme étant influencés par la diversification des cultures (tableau 1) (Keichinger, 2001 ; Palomo-Campesino *et al.*, 2018 ; Tibi & Therond, 2017).

Tableau 1 les SE retenus

SE pour l'agriculteur	SE commun (agriculteur et société)	SE pour la société
Régulation des adventices Régulation des maladies Régulation des ravageurs Pollinisation Fourniture d'azote Structuration du sol	Contribution au stockage de carbone Érosion des sols Lixiviation du nitrate Stockage de l'eau	Habitat pour les espèces sauvages Esthétique du paysage

Mode de calcul : présentation générale

Pour chaque SE du tableau 1, les critères identifiés comme les plus pertinents ont été identifiés puis agrégés. La notation des critères, comme de la valeur finale des SE et des agrégations intermédiaires, se fait par une valeur comprise entre 0 (risque élevé ou effet négatif) et 1 (risque nul ou effet positif). La note peut être, selon les SE, attribuée à chaque culture (Ex : tableau avec les valeurs de pollinisation, non présenté) ou à chaque couple précédent/culture (Ex : matrice croisant les cultures implantées à l'année n et les cultures de n-1, pour la régulation des maladies). Enfin, différents modes d'agrégation sont utilisés pour passer des variables au résultat du SE : moyenne ou équation issue de la bibliographie. La notation, comme les paramètres des équations, peut provenir directement de la bibliographie (Ex : C-factor pour l'érosion des sols) ou en être inspirée mais simplifiée (cas de l'absorption et de la fourniture d'azote). Elle peut aussi être le fruit de différentes expertises (Ex. régulations des maladies). Selon les SE, on obtient directement un résultat à la rotation (temps de retour pour les maladies) ou on passe par une étape supplémentaire avec un premier résultat annuel (par culture ou par couple culture/précédent) avant un résultat à la rotation.

Dans les paragraphes suivants, trois SE seront décrits en détail. Ils correspondent à trois voies importantes dans l'intensification écologique : la gestion des bio-agresseurs, avec la régulation des

maladies, le cycle biogéochimique, avec la fourniture d'azote et la protection et la fertilité des sols, avec la structuration du sol.

Présentation de l'indicateur régulation des maladies : I-SER_maladies

La rotation a un effet sur certaines maladies en permettant de rompre leurs cycles de développement et en diminuant l'inoculum (Charles *et al.*, 2011 ; Krupinsky *et al.*, 2002 ; Ratnadass *et al.*, 2012). Cela passe par l'introduction de cultures non hôtes (effet succession ou précédent), le plus souvent en changeant de familles de cultures, afin d'augmenter le temps de retour (Krupinsky *et al.*, 2002) de la culture sensible. Ces effets de la diversification de la rotation sur l'inoculum (succession et temps de retour) sont couplés à des effets indirects comme la diversité de la microflore et microfaune issue de la diversité de résidus et de racines qui vont permettre de mieux réguler les pathogènes (Bailey & Lazarovits, 2003 ; Ghorbani *et al.*, 2008 ; Ratnadass *et al.*, 2012). Toutefois, la diversification de la rotation n'aura pas d'influence sur les maladies qui ont des possibilités de dissémination importante ou qui ont une durée de vie longue sous certaines formes (Ratnadass *et al.*, 2012).

Le calcul se fait avec l'équation suivante :

$$\text{I-SER_maladies} = (\sum (M_{C_{i-1}/C_i})) / n * \prod (V_{\text{ref}_i} / V_{\text{réel}_i})^2$$

Avec :

- M_{C_{i-1}/C_i} : note de l'effet sur la pression maladie de la culture précédente (C_{i-1}) sur la culture en cours (C_i) lors de la succession du couple « précédent/culture ». Une matrice à double entrée a été créée afin de prendre en compte tous les couples « précédent/culture » possibles (C_{i-1}/C_i) auxquels une note sera attribuée : valeur 1 pour les successions qui ne posent aucun problème et 0 pour les successions fortement déconseillées. Ces notes sont issues de la bibliographie (APCA, 2017 ; Jeangros & Courvoisier, 2019). A partir des effets connus des successions de cultures, les auteurs ont établi un code couleur qui définit 5 classes et auxquelles nous avons fait correspondre les valeurs 0, 0.25, 0.5, 0.75 et 1 dans la matrice que nous avons construite.
- n : durée de la rotation en années
- V_{ref_i} : temps de retour conseillé de la culture ou de la famille i . Les valeurs varient de 1 pour les cultures qui ne posent pas de problème de délai de retour, et qui pourraient théoriquement donc revenir tous les ans à 0,17 pour les cultures sensibles, nécessitant un retour tous les 6 ans pour limiter la pression de certains bio-agresseurs. (APCA, 2017 ; Jeangros & Courvoisier, 2019).
- $V_{\text{réel}_i}$: temps de retour réel de la culture i . On comptabilisera pour chacune des 13 cultures, familles de cultures ou groupes de cultures (céréales à paille, maïs, légumineuses, lin, colza-tournesol-soja-tabac-chou, betterave, sarrasin, pomme de terre, sorgho, luzerne, chanvre, pavot et cucurbitacées) le nombre de fois où ils sont présents dans la rotation, divisé par la durée de la rotation, pour obtenir le temps de retour réel.

Remarque : Si $V_{\text{réel}} < V_{\text{ref}}$ alors le temps de retour est suffisamment long et l'indice est égal à 1, dans le cas contraire on retiendra la valeur $V_{\text{ref}}/V_{\text{réel}}$.

Présentation de l'indicateur fourniture d'azote : I-SER_fournitureN

Dans une rotation, l'apport d'azote, autre que sous forme d'intrant minéral ou organique, est le fait principalement, des légumineuses (fabaceae) capables de fixer l'azote atmosphérique. Leur introduction dans les rotations permettent de diminuer l'apport d'azote au moment de leur culture mais aussi de fournir des quantités d'azote non négligeables à la culture suivante, jusqu'à 100kg

² \sum = somme et \prod = produit

N/ha mais plus généralement quelques dizaines de kg (Vertès *et al.*, 2015). Ces cultures peuvent être introduites de différentes façons dans la rotation, comme culture principale, en association et aussi de plus en plus comme intercultures et vont permettre de diminuer les apports globaux d'azote. D'autres plantes d'interculture (Ex. crucifères) peuvent absorber les reliquats d'azote avant hiver et les restituer en partie après leur destruction et leur enfouissement ; dans ce cas, les quantités restent généralement assez limitées, entre 10 et 20 kg N/ha³. Par contre, des intercultures en mélanges avec des légumineuses peuvent dans certains cas (intercultures longues et cultures d'été pour n+1) atteindre 35 à 50 kg N/ha (Guillier *et al.*, 2020).
Le calcul se fait avec l'équation suivante :

$$I-SER_FournitureN = (\sum (NC_{pi} + NP_i))/n$$

Avec :

- **NC_{pi}** : note de fourniture d'azote par la culture i en cours : 1 pour une légumineuse et 0 pour une céréale. En cas de mélange, la note de fourniture correspond à la moyenne des cultures présentes
- **NP_i** : fourniture d'azote du précédent (culture principale et/ou intermédiaires) de la culture i : 0 pour un précédent « céréale » et 0,65 pour un précédent « luzerne » (présente durant 4 années). Le maximum est donc fixé 0,65 dans ce cas car la culture précédente, quelle qu'elle soit, ne peut fournir uniquement par sa minéralisation suffisamment d'azote à la culture suivante.
- **n** : durée de la rotation (années)

Remarque : La somme NC_{pi} + NP_i est plafonnée à 1 pour chaque année de la rotation

Présentation de l'indicateur structuration du sol : I-SER_structuration sol

La structuration du sol évolue constamment en fonction de contraintes climatiques (gel/dégel, dessiccation/humectation, formation d'une croûte de battance), anthropiques (travail du sol, tassement,) et biologiques (macrofaune fouisseurs, croissance racinaire) (Therond *et al.*, 2017). Parmi l'ensemble de ces contraintes, les systèmes racinaires avec des caractéristiques différentes selon les plantes (types de système, développement, intensité) ont des effets sur la structure du sol. Cet effet positif des racines pourra se faire directement par la capacité de perforation, d'agrégation des constituants du sol ou indirectement en favorisant les interactions avec les micro-organismes au sein de la rhizosphère ou par alternance de dessiccation / humidification (Govindin, 2014). L'alternance de systèmes racinaires (pivot, fasciculé ou mixte) agit aussi sur la structuration par leur complémentarité (effet perforant et/ou agrégeant, profondeur, densité). Toutefois, l'effet structurant est très variable d'une culture ou famille de culture à l'autre. Par exemple, les légumineuses -ou fabacées- ont en général, à l'exception de la luzerne, un système racinaire moins développé du fait de l'utilisation de substrat carboné pour les nodosités (Voisin *et al.*, 2015), ce qui les rend moins efficaces pour structurer le sol. Enfin, la durée de culture a une influence, les intercultures courtes étant moins efficaces que les plantes annuelles, elles même moins efficaces que les plantes pluriannuelles (Govindin, 2014).

Toutefois, malgré la présence d'un système racinaire performant et donc structurant, cet effet peut, dans certains cas, être annihilé si une partie des itinéraires techniques est réalisée pendant des périodes humides et avec des machines qui sont de plus en plus lourdes. C'est surtout le cas de la récolte et en particulier quand celle-ci a lieu au cours de l'automne (betteraves, par exemple) (Boizard *et al.*, 2004).

$$I-SER_structuration\ sol = (\sum (SSC_i * ECC_i))/n * DSR$$

³ Arvalis : <https://www.terre-net.fr/ulf/data/Redaction/Cipan-tab-azote.JPG>

Avec :

- **SSC_i** : note d'effet structurant du système racinaire de la culture *i* : variant de 0,4 (et non 0 car chaque culture dispose d'un système racinaire, même si celui-ci n'est pas très performant, capable de structurer le sol) et 1 (culture pérenne avec un système racinaire très structurant associant pivot et chevelu racinaire fasciculé par exemple).
- **ECC_i** : note d'effet chantier sur le tassement du sol lors de la récolte de la culture *i* : variant entre 0 (fort tassement lié au passage de machine lourde en période généralement humide) à 1 (passage d'engin n'entraînant pas d'effet sur la structure : période généralement sèche).
- **DSR** : indice de diversité des systèmes racinaires des cultures de la rotation. Chaque culture est classée selon son système racinaire (pivot, fasciculé ou mixte) puis un indice de diversité de ces systèmes racinaires est calculé en fonction de la proportion de chaque système sur la durée de la rotation. L'indice varie de 0.33 pour la présence d'un seul système à 1 pour une répartition équitable des trois systèmes.
- **n** : durée de la rotation (années)

Autres indicateurs de services écosystémiques

Tableau 2 Critères retenus pour l'évaluation des SE et principales références bibliographiques

Service écosystémique	Principaux critères	Échelle temporelle du calcul	Mode de calcul	Références bibliographiques
Régulation des adventices	Effet couvrant des cultures Alternance des dates de semis	Précédent / culture	Indice = (max(effet étouffement ; effet nettoyant précédent); changement date de semis)	(Adeux et al., 2019) (Gaba et al., 2014) (Weisberger et al., 2019)
Régulations des ravageurs	Effet précédent	Précédent / culture	Note attribuée au couple « précédent / culture »	(Ratnadass et al., 2012) (Rusch et al., 2013, 2016)
Pollinisation	Potentiel à la floraison	Culture	Moyenne des notes attribuées à chaque culture	(Davaine, 2012) (Hass et al., 2018)
Stockage d'eau	Consommation (C) Période de consommation (T)	Culture	Indice = (C+T)/2	(Allen et al., 1998)
Lixiviation de nitrates	Minéralisation des résidus de culture et du sol Absorption N avant hiver	Précédent / culture	Indice = (minéralisation résidus et sol - absorption N)	(Beaudoin et al., 2005) (Vertès et al., 2015) (Voisin et al., 2015)
Érosion des sols	C-factor (modèle RUSLE)	Culture	Indice = 1-2*C-factor	(Panagos et al., 2015)
Contribution au stockage de carbone	Apport potentiel de la culture	Culture	Moyenne (apport cultures principales ; cultures intermédiaires)	(Justes et al., 2012) (Pellerin et al., 2019)
Habitat pour les espèces sauvages	Appétence (A) Protection (P) Temps de présence (T)	Culture	Indice = (P+A)/2*T	(Keichinger, 2001)
Esthétique du paysage	Ouverture (O) Aspect floraison : épiaison (FE) Aspect au cours du cycle (A) Temps de présence (T)	Culture	Indice = (O+FE*A)*T/2	(Junge et al., 2015) (Schüpbach et al., 2016)

Agrégation des indicateurs SE : I-SER

Après avoir évalué indépendamment chaque SE, les indicateurs obtenus sont agrégés pour déterminer l'impact global de la rotation. La méthode d'agrégation consiste en une moyenne et aucune pondération des SE ne sera appliquée. En effet, rien dans la bibliographie ne permet, à ce jour, d'avantager certains SE au détriment d'autres. Il sera cependant possible par la suite d'introduire une pondération en fonction des objectifs et/ou de contraintes locales. La moyenne comme mode d'agrégation pose toutefois quelques problèmes méthodologiques comme l'effet de compensation : certains services pourraient ne pas être rendus (valeur autour de 0) mais seraient compensés par d'autres services mieux rendus (valeur autour de 1). Au final, ce cas de figure est similaire à une rotation fournissant tous les SE de façon moyenne (valeur autour de 0.5). Afin de limiter cet effet de compensation, nous avons ajouté un second membre à l'équation de calcul de I-SER, à savoir la prise en compte de la valeur minimale et maximale des 12 SE ainsi que de l'écart type, afin de pénaliser les rotations rendant des services très disparates. Nous avons corrigé ce terme par un facteur déterminé empiriquement à partir de cas concrets. Il exprime un niveau de compensation toléré (Bockstaller *et al.*, 2017).

$$\text{I-SER} = \text{Moyenne} - [(\text{Max} - \text{Min}) * \text{Ecart-type} * 0,5]$$

Autres composantes de l'indicateur de Diversité Globale des Cultures

Diversité taxonomique (I-DCR)

L'indicateur généralement utilisé pour évaluer la diversité issue des cultures est l'indice de Shannon (Sirami *et al.*, 2019 ; Uthes *et al.*, 2020) et, dans une moindre mesure, l'indice de Gini-Simpson (Thuiller *et al.*, 2014). Toutefois, ces indices sont sensibles respectivement aux espèces à faible ou à fort effectifs et leurs résultats ne sont pas toujours très compréhensibles. Le choix s'est porté sur l'indice de Simpson inversé (D) qui apparaît mieux à même de rendre compte de cette diversité (Chao *et al.*, 2014 ; Hill, 1973 ; Jost, 2006). Cet indice de diversité donne le nombre effectif d'espèces, appelé encore vraie diversité, et les résultats sont plus lisibles. Par exemple, pour une rotation de trois ans avec trois cultures différentes, $D = 3$.

$$D = 1 / \sum P_i^2$$

Avec P_i la proportion de la culture i dans la rotation

Pour des valeurs de D comprises entre 0 et 10 (au-delà de 10, I-DCR = 1), la valeur de D est transformée en indicateur (variant entre 0 et 1) suivant l'équation :

$$\text{I-DCR} = 0.4328 \ln(D)$$

Les paramètres de l'équation proviennent de la courbe logarithmique passant par les points correspondants à 1, 2, 4 et 10 cultures avec respectivement des valeurs de 0, 0.3, 0.6 et 1. Cette fonction donne un poids de plus en plus faible à une culture supplémentaire au fur et à mesure que le nombre total de cultures augmente. Le passage d'une à deux cultures permet une forte augmentation. Par ailleurs, une rotation de quatre cultures différentes, correspondant à la référence du cahier des charges de la Production Intégrée (Boller *et al.*, 1997; Viaux, 1999) prend une valeur de 0,6, légèrement au-dessus de la moyenne mais exprimant le fait qu'on se situe à un bon niveau mais qu'il reste un potentiel d'amélioration.

Diversité spatiale (I-DSR)

La biodiversité dépend à la fois de l'hétérogénéité de la composition, ici la diversité de culture de la rotation, et de l'hétérogénéité spatiale des cultures (Fahrig *et al.*, 2011 ; Hass *et al.*, 2018), c'est-à-dire dans le cas d'agroécosystème, à l'assolement. Cette hétérogénéité passe, entre autres, par la

taille et la forme du parcellaire et dépend donc du périmètre de la parcelle et de l'effet lisière qui en découle (Uthes *et al.*, 2020).

Si l'assolement est fonction en partie de la rotation, avec les données d'entrée disponibles (succession de cultures uniquement), il n'est pas possible de déduire un indicateur du niveau d'hétérogénéité induit. En revanche, une des voies pour augmenter la diversité spatiale est l'utilisation de la culture en bandes au sein d'une parcelle, à savoir une alternance de cultures semées sur des largeurs de quelques mètres seulement. Pour intégrer cette technique dans notre méthode d'évaluation, tout en sachant que la longueur de lisière est d'autant plus élevée que la parcelle est allongée (largeur faible), la variable retenue est la largeur de la parcelle ou de la bande de culture au sein de la parcelle. Celles-ci permettent d'approcher l'effet lisière. Plus la largeur d'une parcelle ou d'une bande est faible, plus il y a un effet lisière qui peut être favorable aux interactions biotiques comme la régulation naturelle des ravageurs. Cette donnée de largeur sera ensuite transformée en indicateur en posant : I-DSR = 1 pour une largeur de 3 m, I-DSR = 0,5 pour une largeur de 27 m et I-DSR = 0 pour une largeur de 243 m (au-delà de 243 m, I-DS = 0) ce qui donne par régression l'équation suivante :

$$\text{I-DSR} = -0.228 \ln(l) + 1.25$$

Agrégation pour calculer l'indicateur de diversité globale des cultures (I-DGC)

Comme montré sur la figure 1, l'indicateur de diversité globale des cultures est calculé à partir de trois indicateurs présentés dans les paragraphes précédents, I-SER, I-DCR et I-DSR, respectivement pour évaluer l'effet de la rotation sur les SE, la diversité taxonomique et la diversité spatiale. On définit deux classes floues : favorable (F) et défavorable (D) pour chaque variable (Christian Bockstaller *et al.*, 2017) et la méthode d'agrégation retenue se présente sous forme d'arbres de décision reliés par des règles « si ... alors », ces règles étant facilement compréhensibles par tous. Toutefois, bien souvent il est difficile de noter chacune de ces règles auxquelles s'ajoute la subjectivité de l'expert. Pour plus de transparence sur la détermination des conclusions de ces arbres de décision, la méthode CONTRA (Bockstaller *et al.*, 2017) a été utilisée et les résultats des deux agrégations successives, les pondérations et les corrections apportées sont données dans la figure 2 (a et b). Pour I-DTR (figure 2a), on attribue à l'indice de diversité un poids plus faible que pour les SE rendus (67% pour I-SER et 33% pour I-DCR) : on considère que favoriser l'ensemble des 12 SE aura plus d'effet sur la biodiversité issue des cultures que la diversité taxonomique. Dans un cas (3^e ligne) on attribue une correction négative à la valeur de sortie de I-DTR car on considère qu'un bon indice de diversité taxonomique ne peut compenser le défaut de services rendus par I-SER (-0.08). Pour I-DGC (figure 2b), La diversité temporelle I-DTR a plus de poids (80%) que la diversité spatiale I-DSR (20%). Dans un cas (3^e ligne) on considère que la diversité spatiale peut compenser partiellement un déficit de diversité temporelle par l'effet lisière que cela entraîne (d'où une correction positive de 2).

a)

I-SER	Pondération 1	I-DCR	Pondération 2	I-DTR calibré	Correction en valeur absolue	I-DTR corrigé
F	67	F	33	1		1
F	67	D	0	0,67		0,67
D	0	F	33	0,33	-0,08	0,25
D	0	D	0	0		0

b)

I-DTR	Pondération 1	I-DSR	Pondération 2	I-DGC calibré	Correction en valeur absolue	I-DGC corrigé
F	80	F	20	10		10
F	80	D	0	8		8
D	0	F	20	2	2	4
D	0	D	0	0		0

Figure 2 : Détermination des règles de décision pour l'indicateur de diversité temporelle I-DTR (a) et l'indicateur de diversité globale I-DGC (b). F et D représentent les classes floues « favorable » et « défavorable ».

Principales caractéristiques de l'outil

Pour chaque SE, des tableaux ou des matrices à double entrée ont été constitués. Pour chacune des 46 cultures principales et 46 cultures intermédiaires, les indices pour les critères retenus ont été déterminés. L'outil a été informatisé sous Excel afin de calculer automatiquement les différents indicateurs à partir uniquement de l'ordre dans lequel se succèdent les cultures, de la durée de la rotation et de la largeur de la parcelle. Il permet d'intégrer trois cultures principales successives récoltées sur l'année⁴), avec, à chaque fois, la possibilité d'associer deux cultures. Par ailleurs, il est possible d'associer jusqu'à 6 cultures intermédiaires. Enfin, la durée maximale de la rotation est de 10 ans.

Exemples d'application

Le tableau 3 montre les valeurs obtenues par les indicateurs SE ainsi que pour l'ensemble des SE (I-SER) et celles de l'évaluation temporelle (I-DCR et I-DTR) de quelques rotations couramment rencontrées en France. Les valeurs des indicateurs de SE augmentent généralement avec l'allongement des rotations et du nombre de cultures différentes et occupent une gamme assez large (différence entre Min et Max). L'introduction de culture pérenne (ici, 3 années de luzerne) augmente l'effet bénéfique sur la plupart des SE et donc sur l'indicateur I-SER comme le suggèrent certains auteurs (Martin *et al.*, 2020 ; Piutti *et al.*, 2015). Cette méthode permet aussi d'évaluer en *ex ante* la diversification des rotations.

La figure 3 détaille pour les SE et les indicateurs temporels, le résultat de l'évolution des rotations dans le cadre du projet Syppre⁵ (Toqué *et al.*, 2020 ; Viguier *et al.*, 2021). Même si cette diversification a, selon les régions, où elle était mise en œuvre des objectifs légèrement différents, ce levier a été mobilisé lors de la conception de systèmes de cultures innovants pour :

- Améliorer la gestion des adventices,
- Réduire l'usage de l'azote et des produits phytopharmaceutiques
- Améliorer la fertilité et la structure du sol.

Il apparaît clairement que l'allongement des rotations et la diversification des cultures augmentent l'indicateur de diversité temporelle (I-DTR), principalement du fait du nombre de cultures plus important (principales mais surtout intermédiaires) qui impacte favorablement l'indicateur de diversité I-DCR. L'indicateur I-SER aussi est amélioré mais de manière moins nette, ce qui signifie que globalement la diversification rend mieux et/ou plus de services. Ces résultats sont cependant variables en fonction des services. La diminution de l'usage d'azote minéral passe par l'introduction de légumineuses dans la rotation avec un effet positif attendu sur le SE « fourniture d'azote », mais négatif sur le SE « régulation des maladies », ces cultures étant plus sensibles et nécessitant des temps de retour très longs. L'augmentation des valeurs de plusieurs indicateurs de SE (« fourniture

⁴ Dans l'optique aussi d'une adaptation possible pour le maraîchage

⁵ <https://syppre.fr/>

d'azote », « structuration du sol », « protection du sol », « lixiviation du nitrate » et « stockage du carbone ») est due principalement à l'intégration de nombreuses cultures intermédiaires. Ces dernières, présentes en automne, permettent d'absorber l'azote avant hiver et de couvrir le sol pour éviter l'érosion, avec un système racinaire capable d'améliorer la structure du sol. L'utilisation de légumineuses et de plantes absorbant l'azote après récolte permet de réduire l'apport à effectuer pour la culture suivante grâce à des restitutions après destruction.

La différence observée entre la rotation de référence et la rotation dite diversifiée est aussi très dépendante de la rotation d'origine. Si cette dernière est simple (monoculture de maïs pour le Béarn), alors il est plus facile d'améliorer l'ensemble des indicateurs que pour des rotations déjà plus complexes au départ (quatre cultures principales et deux intermédiaires en Champagne, par exemple).

Tableau 3 Calcul SE, I-SER, I-DCR et I-DTR pour différentes rotations. (« / » sépare deux cultures de deux années culturales ; « - » sépare deux cultures successives la même année culturale ; « _ » sépare la culture principale des cultures intermédiaires la même année culturale ; « + » association de culture (*) Colza / Blé d'hiver / Orge d'hiver / Triticale + légumineuse - Sorgho / Pois d'hiver - Sarrasin / Blé d'hiver _ Féverole / Tournesol / Blé d'hiver _ Luzerne + Trèfle blanc + lentille fourragère

Rotation	Durée (an)	Service Ecosystémique (SE)												I-SER	I-DCR	I_DTR
		Adventices	Maladies	Ravageurs	Fourniture N	Structuration du sol	Pollinisation	Perte azote	Protection du sol	Stockage de C	Valeur paysagère	Habitat	Eau			
Maïs grain	1	0,13	0,38	0,50	0,00	0,14	0,10	0,50	0,24	0,80	0,11	0,28	0,25	0,21	0,00	1,44
Maïs grain / Blé d'hiver	2	0,44	0,38	1,00	0,00	0,18	0,05	0,48	0,42	0,70	0,32	0,49	0,38	0,31	0,30	3,64
Maïs grain / Blé d'hiver _ Moutarde	2	0,53	0,38	1,00	0,08	0,46	0,25	0,73	0,52	0,85	0,42	0,55	0,26	0,41	0,37	4,24
Colza / Blé d'hiver / Orge d'hiver	3	0,45	0,47	0,97	0,05	0,57	0,33	0,54	0,62	0,63	0,59	0,61	0,62	0,47	0,48	4,67
Pois d'hiver / Blé d'hiver_Moutarde / Orge de printemps	3	0,40	0,38	0,93	0,48	0,66	0,33	0,58	0,57	0,63	0,57	0,63	0,60	0,53	0,52	4,94
Betterave sucrière / Blé d'hiver / Colza / Blé d'hiver_Moutarde	4	0,55	0,75	1,00	0,11	0,59	0,35	0,75	0,59	0,65	0,58	0,54	0,41	0,51	0,47	4,78
Luzerne 3 ans / Blé d'hiver_Moutarde / Maïs grain / Blé	6	0,93	0,79	1,00	0,62	0,70	0,21	0,69	0,74	0,88	0,58	0,72	0,20	0,60	0,48	5,16
Rotation longue (*)	8	0,60	0,44	0,96	0,19	0,89	0,45	0,71	0,68	0,77	0,65	0,72	0,49	0,57	1,00	6,74



Figure 3 : Comparaison pour l'ensemble des indicateurs temporels de cinq rotations de cultures (Bea : Béarn ; Ber : Berry ; Cha : Champagne ; Lau : lauragais ; PIC : Picardie) entre système de culture de référence (en bleu) et systèmes de culture innovants diversifiés (en orange) proposés dans le cadre des plates-formes expérimentales du projet SYPPRE (Viguier *et al.*, 2021).

Des descripteurs simples existent pour caractériser la diversification des rotations comme le nombre de cultures ou l'indice de diversité. La figure 4 montre une comparaison entre ces descripteurs couramment utilisés et l'indice I-SER afin de voir s'il existe une relation entre allongement de la rotation (durée et nombre de culture) et les services écosystémiques qui peuvent en résulter. Les données utilisées pour cette comparaison sont issues d'essais avec des rotations de référence et des rotations diversifiées. Elles proviennent de différents projets, comme Syppre (Cf. figure 3) DiverIMPACTS et d'autres identifiés dans des publications (Colnenne-David & Doré, 2014 ; Davis *et al.*, 2012). Pour le nombre de cultures différentes (4a), la durée de la rotation (4b) ou l'indicateur de diversité I-DCR (4c), les courbes ont le même aspect, à savoir une augmentation des SE rendus jusqu'à respectivement 6 cultures, 6 années ou 0.7 d'indice de diversité puis une stagnation au-delà. Dans la première partie de la courbe, la variabilité est importante pour des valeurs d'abscisse identiques. Ceci signifie que, pour des rotations courtes et peu diversifiées, le choix des cultures de la rotation va influencer fortement sur le résultat final : il est donc possible d'avoir un assez bon niveau de services rendus même pour une rotation de 3 ans. Pour la seconde partie de la courbe, l'indicateur I-SER plafonne autour de 0.55, ce qui signifie que l'allongement ou la diversification des cultures ne permettent plus d'augmenter le service rendu par compensation entre les SE. Comme constaté sur la figure 3, des antagonismes existent entre services (fourniture d'azote vs régulation des maladies par l'introduction de légumineuses). Ces résultats confortent le choix d'évaluer précisément les SE pour aller plus loin que l'utilisation de descripteurs simples. Certaines rotations courtes peuvent en effet rendre des SE alors que la diversification ou l'allongement au-delà d'un certain seuil ne permettent pas de rendre des services à la hauteur du changement que cela implique pour l'agriculteur (itinéraires techniques, matériel, connaissances nécessaires, ...).

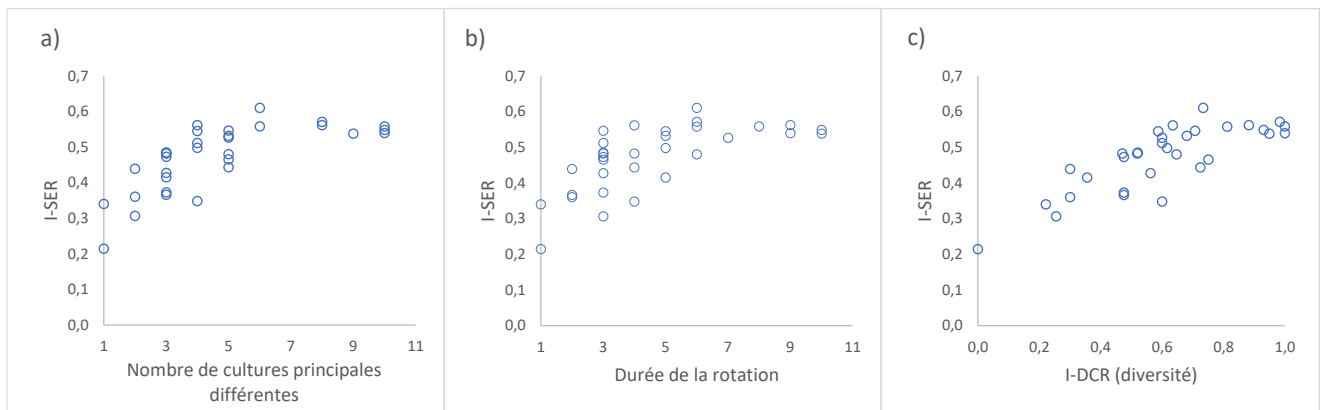


Figure 4 : Relation entre l'indicateur I-SER et des descripteurs de la diversité : (a) nombre de cultures principales différentes, (b) durée de la rotation, (c) l'indice de diversité (I-DCR).

Discussion

La méthode proposée dans cet article est originale car elle traite de la diversification des rotations et des SE qu'elle rend, cette relation étant peu intégrée aux indicateurs de durabilité (Soulé *et al.*, en révision). Généralement, les effets des rotations sont évalués par des descripteurs simples (nombre de culture, indice de diversité) ou se focalisent uniquement sur quelques SE à l'origine de la diversification. Des travaux antérieurs avaient déjà entrepris d'intégrer les effets des successions de cultures sur les maladies ou la structure du sol mais sans conceptualiser le terme de services écosystémiques (Bockstaller & Girardin, 1996 ; Girardin *et al.*, 2000 ; Leteinturier *et al.*, 2006). De même, des tableaux de notation existent où sont notées les différentes successions possibles mais, encore une fois, ils se concentrent sur un nombre limité de services (APCA, 2017 ; Jeangros & Courvoisier, 2019 ; Maillard *et al.*, 1995 ; Viaux, 1999).

Les premiers tests montrent que l'outil, pour sa partie évaluation des SE, semble fournir des résultats attendus et en accord avec les connaissances actuelles. C'est le cas par exemple avec l'introduction de légumineuses dans la rotation qui permet d'améliorer certains SE (fourniture d'azote) au détriment d'autres (régulation des maladies), ce qui a été observé par d'autres auteurs (Moussart *et al.*, 2019). C'est pour éviter en partie cette substituabilité que l'on a lors de l'agrégation des SE, complexifier l'équation afin de défavoriser les rotations rendant des SE très disparates. L'outil est aussi capable de différencier les rotations (simplifiée vs diversifiée) et de montrer que l'allongement de celles-ci et, par conséquent, l'augmentation du nombre de cultures, permet globalement une meilleure fourniture de services. Cependant, une augmentation nette de l'indice de diversité de cultures (I-DCR) ne conduit pas forcément à une augmentation de l'indicateur de fourniture de services (I-SER) même si celui-ci est mieux corrélé que d'autres descripteurs plus simples (durée de la rotation, nombre de cultures). Ceci se voit notamment avec le plafonnement des valeurs de I-SER après 6 cultures autour de 0,55 ce qui met en évidence qu'il n'existe pas de rotations qui pourraient favoriser l'ensemble des services. Ceci s'explique par le fait que certains SE sont antagonistes : les intercultures protègent le sol mais consomment de l'eau ; l'introduction de légumineuses fournit de l'azote mais entraîne plus de risque de maladies. Les meilleurs résultats sont obtenus par des rotations avec des cultures pluriannuelles (prairies, luzernières) comme l'ont montré certains auteurs (Martin *et al.*, 2020 ; Viaud *et al.*, 2018). Il est à noter que ce seuil de 6 cultures a déjà été identifié pour la diversité des cultures en lien avec la résilience des systèmes de production (Zampieri *et al.*, 2020). I-DCR semble être le descripteur le mieux corrélé avec I-SER, ce qui permettrait d'évaluer facilement I-SER à partir de I-DCR et poserait aussi la question de leur agrégation (simplification de l'outil). Mais, on note plutôt une complémentarité aux vues de la variabilité de celui-ci (autour de 0.4 point sur 1) pour une même valeur de I-SER (Figure 4c). Par ailleurs I-DCR apporte une information sur le potentiel de diversité des cultures à l'échelle de l'assolement, facteur important dans le déterminisme de la biodiversité (Sirami *et al.*, 2019) qui n'est que peu exprimé dans I-SER.

L'indicateur présenté dans cet article s'appuie sur les connaissances actuelles pour le choix des variables, leur agrégation et les valeurs attribuées à chaque culture ou couples de cultures (cultures successives). L'ensemble de la construction est justifié, autant que possible, par la bibliographie scientifique ainsi que par l'expertise (guide d'instituts techniques ou de chambres d'agriculture). Mais comme toute méthode d'évaluation, il est nécessaire de la valider (Bockstaller & Girardin, 2003). Lors d'un atelier de travail organisé dans le cadre du débat agronomique de l'AFA, l'outil a été présenté, afin d'améliorer à dire d'expert la construction de chaque indicateur de SE. À la suite des remarques, des améliorations ont été apportées. La validation effective reste la comparaison entre les valeurs des indicateurs et des mesures de terrain (Bockstaller & Girardin, 2003). Cette partie est actuellement en cours, en commençant avec l'identification et le recueil de jeux de données potentiellement utilisables. Toutefois, l'outil se base uniquement sur la rotation alors que la plupart des expérimentations qui pourraient être utilisées sont multifactorielles, situées dans des contextes pédoclimatiques et avec des itinéraires techniques différents. Il faudra certainement adapter la validation à cette difficulté en utilisant, par exemple, des courbes enveloppes pour définir des zones de vraisemblance lors des comparaisons de résultats (Bockstaller & Girardin, 2003). Dans un premier temps, nous nous attellerons à valider les indicateurs portant sur les SE.

Ce travail de validation pourra mettre en évidence les limites de l'indicateur dans sa forme actuelle avec la non prise en compte d'éléments de contexte (sol, climat, pression phytosanitaire, etc.). Un autre atelier de l'AFA a été consacré à cette contextualisation de l'outil avec, par exemple, la possibilité de pondérer les SE en fonction de la tension sur une ressource ou de la présence/absence pour certains critères (e.g. disponibilité en l'eau, absence de certaines maladies dans certains contextes pédoclimatiques). Ce travail est en cours mais entrainera un besoin plus important de données.

Avec un nombre réduit de variables d'entrée cet outil est facile à mettre en œuvre et ses sorties exprimées sous forme de note sont aisément compréhensibles, ce qui répond à l'objectif d'opérationnalité à l'origine de ce travail. L'idée était de pouvoir argumenter facilement sur

« pourquoi 4 cultures plutôt que 3 ? 5 plutôt que 4 ? » dans le conseil pour la diversification des systèmes de culture. En outre, la construction hiérarchique permet d'en faire un outil d'accompagnement pour à la fois avoir un résultat global pour comparer des systèmes et avoir des notes non agrégées pour les analyser et les comprendre. Il peut donc être utilisé par différents acteurs (agronomes, agriculteurs, décideurs de la PAC). Par exemple, lors de co-conception de systèmes de cultures innovants avec plusieurs objectifs (mais qui en termes de services rendus se limitent bien souvent à 3 ou 4), la méthode permettrait d'évaluer le niveau d'atteinte de leurs objectifs mais aussi de vérifier qu'il n'existe pas d'antagonismes avec les autres services non ciblés. Tout du moins, l'outil permettra de mettre en évidence ces effets souvent non intentionnels et éventuellement d'y pallier soit en faisant encore évoluer la rotation soit en proposant d'agir sur certaines pratiques atténuantes. De plus, l'évaluation de chaque SE indépendamment aura un plus grand intérêt pour les agriculteurs qu'un indice de diversité seul ou que l'indicateur global I-DGC : il pourra directement constater en quoi la diversification lui sera bénéfique car une grande partie des services considérés sont ceux qui lui sont rendus. En revanche, l'indicateur global pourrait être associé à d'autres indicateurs traitant d'autres enjeux environnementaux et socio-économiques dans une évaluation multicritère ex ante de scénarios de diversification potentielle. Par ailleurs, le besoin de disposer d'outil agrégé avec une seule valeur finale facilitera la prise de décision d'acteurs institutionnels. Dans ce cas, il faudrait peut-être définir des seuils d'acceptabilité pour chaque SE afin d'éviter de généraliser certaines rotations qui poseraient un problème vis-à-vis d'un ou plusieurs SE, même si le mode d'agrégation tend à minimiser la substituabilité. Cela permettrait de compléter la valeur agrégée de signaux d'alerte pour éviter la perte d'information lors de l'agrégation (Nardo *et al.*, 2005). D'ailleurs, pour un usage plus généralisé (suivi de mesure PAC, par exemple) il serait possible d'opérationnaliser la méthode en regroupant les cultures par famille afin de simplifier au maximum la donnée d'entrée.

À une échelle supérieure, cet indicateur simplifié utilisant la famille de culture comme une donnée d'entrée unique pourrait être calculé sur de grands territoires et pour une certaine durée à partir des données issues de la cartographie et/ou d'imagerie satellite afin d'évaluer les SE qui sont fournis ou l'effet de certaines politiques publiques (Bockstaller *et al.*, 2021). L'indicateur de diversité I-DCR pourrait être enrichi par une composante spatiale prenant en compte le périmètre des parcelles, la surface et la configuration (fragmentation, connectivité), (Uthes *et al.*, 2020).

Conclusion

L'indicateur de diversité globale des rotations de cultures (I-DGC) est un indicateur opérationnel facile à mettre en œuvre car ne nécessitant de connaître que la nature des cultures (principales et intermédiaires) et leur ordre de succession ainsi que la largeur de la parcelle cultivée. Le mode de construction hiérarchique avec des évaluations à différentes échelles (temporelle et spatiale) ainsi que la prise en compte d'un grand nombre de services écosystémiques permettent d'évaluer l'effet de la diversification d'une rotation ou d'en comparer plusieurs entre elles. Cette décomposition permet aussi une meilleure compréhension du résultat final en remontant aux services rendus par la rotation et contribue à promouvoir la diversification en montrant l'intérêt que celle-ci peut avoir pour l'agriculteur au regard des services rendus.

Deux perspectives ont été identifiées, lors des ateliers AFA, pour la suite de ce travail. En premier lieu, l'indicateur pourrait être contextualisé de façon à acquérir une plus grande finesse dans l'évaluation. Cela nécessitera un nombre croissant de données à recueillir de façon à caractériser le milieu, la pression phytosanitaire... mais permettra une meilleure prise en compte de certains processus et l'explication de certains résultats obtenus. En second lieu, pour un usage à l'échelle d'une région ou d'un pays afin d'évaluer des politiques publiques, la méthode devra être simplifiée (e.g. prise en compte des familles de cultures et pas seulement des espèces individuelles) afin d'être adaptée aux types de données d'entrée disponibles à ces niveaux d'étude.

Remerciements

Ce travail a été initié dans le projet européen H2020 ‘Diversification through Rotation, Intercropping, Multiple Cropping, Promoted with Actors and value-Chains towards Sustainability’ (DiverIMPACTS, Grant agreement n°727482) et a été financé par le GIS Grande Culture à Hautes Performances Économiques et Environnementales (GC HP2E). Les auteurs tiennent à remercier l’Association Française d’Agronomie et, plus particulièrement, Antoine Messéan, Jérôme Busnel et les participants des ateliers dédiés à l’indicateur. Ils remercient aussi Clotilde Toqué, Sophie Dubois, Anne-Laure Toupet de Cordoue (Arvalis Institut du Végétal), Stéphane Cadoux (Terres Inovia) et Rémy Duval (ITB) pour leur avoir fourni les données des expérimentations Syppre à des fins d’évaluation et d’amélioration de l’indicateur.

Bibliographie

- Adeux, G., Munier-Jolain, N., Meunier, D., Farcy, P., Carlesi, S., Barberi, P., & Cordeau, S. (2019). Diversified grain-based cropping systems provide long-term weed control while limiting herbicide use and yield losses. *Agronomy for Sustainable Development*, 39(4), 1–13.
- Allen, R. G., Pereira, L. S., Raes, D., Smith, M., & others. (1998). Crop evapotranspiration-Guidelines for computing crop water requirements-FAO Irrigation and drainage paper 56. *Fao, Rome*, 300(9), Do5109.
- APCA. (2017). *Grandes cultures biologiques : les clés de la réussite. Guide technique réalisé par le réseau agriculture biologique des Chambres d’agriculture.*
- Bailey, K., & Lazarovits, G. (2003). Suppressing soil-borne diseases with residue management and organic amendments. *Soil & Tillage Research - SOIL TILL RES*, 72, 169–180. [https://doi.org/10.1016/S0167-1987\(03\)00086-2](https://doi.org/10.1016/S0167-1987(03)00086-2)
- Beaudoin, N., Saad, J. K., Van Laethem, C., Machet, J. M., Maucorps, J., & Mary, B. (2005). Nitrate leaching in intensive agriculture in Northern France: Effect of farming practices, soils and crop rotations. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 111(1–4), 292–310.
- Bockstaller, C., Sirami, C., Sheeren, D., Keichinger, O., Arnaud, L., Favreau, A., Angevin, F., Laurent, D., Marchand, G., De Laroche, E., & others. (2021). Apports de la télédétection au calcul d’indicateurs agri-environnementaux au service de la PAC, des agriculteurs et porteurs d’enjeu. *Innovations Agronomiques*, 83, 43–59.
- Bockstaller, Christian, Beauchet, S., Manneville, V., Amiaud, B., & Botreau, R. (2017). A tool to design fuzzy decision trees for sustainability assessment. *Environmental Modelling & Software*, 97, 130–144.
- Bockstaller, Christian, Feschet, P., & Angevin, F. (2015). Issues in evaluating sustainability of farming systems with indicators. *Oléagineux, Corps Gras, Lipides*, 22(1).
- Bockstaller, Christian, & Girardin, P. (1996). The crop sequence indicator: a tool to evaluate crop rotations in relation to the requirements of Integrated Arable Farming Systems. *Advances in Applied Biology*, 47, 405–408.
- Bockstaller, Christian, & Girardin, P. (2003). How to validate environmental indicators. *Agricultural Systems*, 76(2), 639–653.
- Boizard, H., Richard, G., Defossez, P., Estrade, J. R., & Boiffin, J. (2004). Etude de l’effet à moyen et long terme des systèmes de culture sur la structure d’un sol limoneux-argileux du Nord du Bassin Parisien. *Etudes et Gestions Des Sols*, 11(1), 11–20.
- Boller, E. F., Malavolta, C., & Jörg, E. (1997). Guidelines for Integrated Production of Arable Crops in Europe: IOBC Technical Guideline III. *IOBC Wprs Bulletin*, 20.
- Bommarco, R., Kleijn, D., & Potts, S. G. (2013). Ecological intensification: harnessing ecosystem services for food security. *Trends in Ecology & Evolution*, 28(4), 230–238.
- 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(1), 297–324. <https://doi.org/10.1146/annurev-ecolsys-120213-091540>
- Charles, R., Cholley, E., Frei, P., & Mascher, F. (2011). Maladies et rendement du ble d’automne : influence du système de culture. *Recherche Agronomique Suisse*, 2, 264–271.
- Colnenne-David, C., & Doré, T. (2014). Designing innovative productive cropping systems with quantified and

- ambitious environmental goals. *Renewable Agriculture and Food Systems*, 30(6), 487–502.
- Davaine, J.-B. (2012). Evolution récente de la ressource mellifère dans le paysage agricole français: le cas des grandes cultures et des productions fourragères. *Bulletin de l'Académie Vétérinaire de France*.
- Davis, A. S., Hill, J. D., Chase, C. A., Johanns, A. M., & Liebman, M. (2012). Increasing Cropping System Diversity Balances Productivity, Profitability and Environmental Health. *PLOS ONE*, 7(10), e47149. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0047149>
- El Titi, A., Boller, E., & Gendrier, J. P. (1993). Production Intégrée. Principes et directives techniques. *Bulletin OILB*.
- Fahrig, L., Baudry, J., Brotons, L., Burel, F. G., Crist, T. O., Fuller, R. J., Sirami, C., Siriwardena, G. M., & Martin, J.-L. (2011). Functional landscape heterogeneity and animal biodiversity in agricultural landscapes. *Ecology Letters*, 14(2), 101–112. <https://doi.org/10.1111/j.1461-0248.2010.01559.x>
- Fahrig, L., Girard, J., Duro, D., Pasher, J., Smith, A., Javorek, S., King, D., Lindsay, K. F., Mitchell, S., & Tischendorf, L. (2015). Farmlands with smaller crop fields have higher within-field biodiversity. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 200, 219–234. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2014.11.018>
- Félix, I. (2015). Effet de la rotation sur le potentiel de rendement des cultures. Synthèse d'essais de longue durée. *Le Courrier de l'environnement de l'INRA*, 65(65), 71–86.
- Gaba, S., Fried, G., Kazakou, E., Chauvel, B., & Navas, M.-L. (2014). Agroecological weed control using a functional approach: a review of cropping systems diversity. *Agronomy for Sustainable Development*, 34(1), 103–119. <https://doi.org/10.1007/s13593-013-0166-5>
- Ghorbani, R., Wilcockson, S., Koocheki, A., & Leifert, C. (2008). Soil management for sustainable crop disease control: a review. *Environmental Chemistry Letters*, 6(3), 149–162. <https://doi.org/10.1007/s10311-008-0147-0>
- Girardin, P., Bockstaller, C., & der Werf, H. (2000). Assessment of potential impacts of agricultural practices on the environment: the AGRO* ECO method. *Environmental Impact Assessment Review*, 20(2), 227–239.
- Govindin, J.-C. (2014). *Les plantes de service : une alternative au travail du sol dans les systèmes de culture d'ananas*. Université des Antilles et de la Guyane.
- Guillier, M., Cros, C., & Reau, R. (2020). AUTO'N-Améliorer l'autonomie azotée des systèmes de culture en Champagne crayeuse. *Innovations Agronomiques*, 79, 193–212.
- Hass, A. L., Kormann, U. G., Tschardtke, T., Clough, Y., Baillod, A. B., Sirami, C., Fahrig, L., Martin, J.-L., Baudry, J., Bertrand, C., Bosch, J., Brotons, L., Burel, F., Georges, R., Giralt, D., Marcos-García, M. Á., Ricarte, A., Siriwardena, G., & Batáry, P. (2018). Landscape configurational heterogeneity by small-scale agriculture, not crop diversity, maintains pollinators and plant reproduction in western Europe. *Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences*, 285(1872), 20172242. <https://doi.org/10.1098/rspb.2017.2242>
- Hill, M. O. (1973). Diversity and evenness: a unifying notation and its consequences. *Ecology*, 54(2), 427–432.
- Hufnagel, J., Reckling, M., & Ewert, F. (2020). Diverse approaches to crop diversification in agricultural research. A review. *Agronomy for Sustainable Development*, 40(2), 1–17.
- Iocola, I., Angevin, F., Bockstaller, C., Catarino, R., Curran, M., Messéan, A., Schader, C., Stilmant, D., Van Stappen, F., Vanhove, P., & others. (2020). An Actor-Oriented Multi-Criteria Assessment Framework to Support a Transition towards Sustainable Agricultural Systems Based on Crop Diversification. *Sustainability*, 12(13), 5434.
- Jeangros, B., & Courvoisier, N. (2019). Rotation des cultures en terres assolées (4e édition). *Recherche Agronomique Suisse*, 10, 4.
- Jost, L. (2006). Entropy and diversity. *Oikos*, 113(2), 363–375. <https://doi.org/10.1111/j.2006.0030-1299.14714.x>
- Junge, X., Schüpbach, B., Walter, T., Schmid, B., & Lindemann-Matthies, P. (2015). Aesthetic quality of agricultural landscape elements in different seasonal stages in Switzerland. *Landscape and Urban Planning*, 133, 67–77. <https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2014.09.010>
- Justes, E., Beaudoin, N., Bertuzzi, P., Charles, R., Constantin, J., Durr, C., Hermon, C., Joannon, A., Le Bas, C., Mary, B., & others. (2012). Réduire les fuites de nitrate au moyen de cultures intermédiaires: conséquences sur les bilans d'eau et d'azote, autres services écosystémiques.
- Keichinger, O. (2001). *Evaluation de l'impact des pratiques agricoles d'exploitations de grandes cultures sur la valeur cynégétique à l'aide d'indicateurs agro-écologiques*. Institut National Polytechnique de Lorraine.

- Kleijn, D., Bommarco, R., Fijen, T. P. M., Garibaldi, L. A., Potts, S. G., & van der Putten, W. H. (2019). Ecological intensification: bridging the gap between science and practice. *Trends in Ecology & Evolution*, 34(2), 154–166.
- Kremen, C., & Miles, A. (2012). Ecosystem services in biologically diversified versus conventional farming systems: benefits, externalities, and trade-offs. *Ecology and Society*, 17(4).
- Krupinsky, J., Bailey, K., McMullen, M., Gossen, B., & Turkington, T. (2002). Managing Plant Disease Risk in Diversified Cropping Systems. *Agronomy Journal*, 94, 955–a. <https://doi.org/10.2134/agronj2002.955a>
- Leteinturier, B., Herman, J.-L., De Longueville, F., Quintin, L., & Oger, R. (2006). Adaptation of a crop sequence indicator based on a land parcel management system. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 112(4), 324–334.
- Maillard, A., Neyroud, J. ., & Vez, A. (1995). Résultats d'un essai de culture sans labour depuis plus de 20 ans à Changins II. Propriétés physiques du sol. *Revue Suisse d'Agriculture*, 27(1), 5–10.
- Martin, A. E., Collins, S. J., Crowe, S., Girard, J., Naujokaitis-Lewis, I., Smith, A. C., Lindsay, K., Mitchell, S., & Fahrig, L. (2020). Effects of farmland heterogeneity on biodiversity are similar to—or even larger than—the effects of farming practices. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 288, 106698. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2019.106698>
- Meynard, J.-M., Messéan, A., Charlier, A., Charrier, F., Le Bail, M., Magrini, M.-B., Savini, I., & others. (2013). Freins et leviers à la diversification des cultures: étude au niveau des exploitations agricoles et des filières. *Ocl*, 20(4), D403.
- Moussart, A., Baranger, A., Plessix, S., & Jaloux, B. (2019). Quels nouveaux leviers pour protéger les légumineuses à graines contre les maladies et les ravageurs? *Innovations Agronomiques*, 74, 39–54.
- Nardo, M., Saisana, M., Saltelli, A., & Tarantola, S. (2005). Tools for composite indicators building. *European Commission, Ispra*, 15(1), 19–20.
- Palomo-Campesino, S., González, J. A., & Garcí'a-Llorente, M. (2018). Exploring the connections between agroecological practices and ecosystem services: a systematic literature review. *Sustainability*, 10(12), 4339.
- Panagos, P., Borrelli, P., Meusburger, K., Alewell, C., Lugato, E., & Montanarella, L. (2015). Estimating the soil erosion cover-management factor at the European scale. *Land Use Policy*, 48, 38–50. <https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2015.05.021>
- Pellerin, S., Bamiere, L., Launay, C., Martin, R., Schiavo, M., Angers, D., Augusto, L., Balesdent, J., Basile-Doelsch, I., Bellassen, V., & others. (2019). Stocker du carbone dans les sols français, Quel potentiel au regard de l'objectif de 4 pour 1000 et à quel coût? Synthèse du rapport d'étude.
- Pikul, J. L., Hammack, L., & Riedell, W. E. (2005). Corn yield, nitrogen use, and corn rootworm infestation of rotations in the northern Corn Belt. *Agronomy Journal*, 97(3), 854–863.
- Piutti, S., Romillac, N., Chanseau, A., Slezack-Deschaumes, S., Manneville, V., & Amiaud, B. (2015). Enjeux et contributions des prairies temporaires pour améliorer la fertilité des sols. *Fourrages*, 223, 179–187.
- Ratnadass, A., Fernandes, P., Avelino, J., & Habib, R. (2012). Plant species diversity for sustainable management of crop pests and diseases in agroecosystems: a review. *Agronomy for Sustainable Development*, 32, 273–303.
- Rusch, A., Bommarco, R., Jonsson, M., Smith, H. G., & Ekbom, B. (2013). Flow and stability of natural pest control services depend on complexity and crop rotation at the landscape scale. *Journal of Applied Ecology*, 50(2), 345–354. <https://doi.org/10.1111/1365-2664.12055>
- Rusch, A., Chaplin-Kramer, R., Gardiner, M. M., Hawro, V., Holland, J., Landis, D., Thies, C., Tschardtke, T., Weisser, W. W., Winqvist, C., Woltz, M., & Bommarco, R. (2016). Agricultural landscape simplification reduces natural pest control: A quantitative synthesis. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 221, 198–204. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2016.01.039>
- Schüpbach, B., Junge, X., Lindemann-Matthies, P., & Walter, T. (2016). Seasonality, diversity and aesthetic valuation of landscape plots: An integrative approach to assess landscape quality on different scales. *Land Use Policy*, 53, 27–35. <https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2015.01.032>
- Sirami, C., Gross, N., Bailod, A. B., Bertrand, C., Carrié, R., Hass, A., Henckel, L., Miguet, P., Vuillot, C., Alignier, A., Girard, J., Batáry, P., Clough, Y., Violle, C., Giral, D., Bota, G., Badenhauer, I., Lefebvre, G., Gauffre, B., ... Fahrig, L. (2019). Increasing crop heterogeneity enhances multitrophic diversity across agricultural regions. *Proc Natl Acad Sci USA*, 116(33), 16442. <https://doi.org/10.1073/pnas.1906419116>

- Soulé, E., Michonneau, P., Michel, N., & Bockstaller, C. (n.d.). Environmental sustainability assessment in agricultural systems or the tower of Babel: a conceptual and methodological review. *Journal of Cleaner Production*.
- Tamburini, G., Bommarco, R., Wanger, T. C., Kremen, C., van der Heijden, M. G. A., Liebman, M., & Hallin, S. (2020). Agricultural diversification promotes multiple ecosystem services without compromising yield. *Science Advances*, 6(45), eaba1715.
- Therond, O., Tichit, M., & Tibi, A. (2017). Volet «écosystèmes agricoles» de l'Évaluation Française des Écosystèmes et des Services Écosystémiques.
- Therond, Olivier, & Duru, M. (2019). Agriculture et biodiversité: les services écosystémiques, une voie de réconciliation? *Innovations Agronomiques*, 75, 29–47.
- Thuiller, W., Pironon, S., Psomas, A., Barbet-Massin, M., Jiguet, F., Lavergne, S., Pearman, P. B., Renaud, J., Zupan, L., & Zimmermann, N. E. (2014). The European functional tree of bird life in the face of global change. *Nature Communications*, 5(1), 1–10.
- Tibi, A., & Therond, O. (2017). Évaluation des services écosystémiques rendus par les écosystèmes agricoles. Une contribution au programme EFSE. <https://hal.inrae.fr/hal-02990427>
- Toqué, C., Angevin, F., Aliaga, C., Cadoux, S., Cavan, N., De Cordoue, A. L., Dubois, S., Tauvel, P., Jouy, L., Sauzet, G., & others. (2020). Combiner expertise, expérimentation et simulation pour une gestion durable des adventices: les plateformes prospectives Syppre. *Innovations Agronomiques*, 81, 173–187.
- Uthes, S., Kelly, E., & König, H. J. (2020). Farm-level indicators for crop and landscape diversity derived from agricultural beneficiaries data. *Ecological Indicators*, 108, 105725. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2019.105725>
- Vertès, F., Jeuffroy, M.-H., Louarn, G., Voisin, A.-S., & Justes, E. (2015). Légumineuses et prairies temporaires : des fournitures d'azote pour les rotations. *Fourrages*, 223, 221–232.
- Viaud, V., Santillan-Carvantes, P., Akkal-Corfini, N., Le Guillou, C., Prévost-Bouré, N. C., Ranjard, L., & Menasseri-Aubry, S. (2018). Landscape-scale analysis of cropping system effects on soil quality in a context of crop-livestock farming. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 265, 166–177.
- Viaux, P. (1999). *Une 3e voie en grande culture: environnement, qualité, rentabilité*. France Agricole Editions.
- Viguer, L., Cavan, N., Bockstaller, C., Cadoux, S., Corre-Hellou, G., Dubois, S., Duval, R., Keichinger, O., Toqué, C., Toupet de Cordoue, A.-L., & Angevin, F. (2021). Combining diversification practices to enhance the sustainability of conventional cropping systems. *European Journal of Agronomy*, 127. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.eja.2021.126279>
- Voisin, A.-S., Cellier, P., & Jeuffroy, M.-H. (2015). Fonctionnement de la symbiose fixatrice de N₂ des légumineuses à graines : Impacts agronomiques et environnementaux. *Innovations Agronomiques*, 43, 139–160.
- Weisberger, D., Nichols, V., & Liebman, M. (2019). Does diversifying crop rotations suppress weeds? A meta-analysis. *PLOS ONE*, 14(7), e0219847. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0219847>
- Zampieri, M., Weissteiner, C. J., Grizzetti, B., Toreti, A., van den Berg, M., & Dentener, F. (2020). Estimating resilience of crop production systems: From theory to practice. *Science of The Total Environment*, 735, 139378.
- Zhang, J., Heijden, M. G. A., Zhang, F., & Bender, S. F. (2020). Soil biodiversity and crop diversification are vital components of healthy soils and agricultural sustainability. *Frontiers of Agricultural Science and Engineering*, 7(3), 236.



Les articles sont publiés sous la licence Creative Commons 2.0. La citation ou la reproduction de tout article doit mentionner son titre, le nom de tous les auteurs, la mention de sa publication dans la revue AE&S et de son URL, ainsi que la date de publication.