



Revue AE&S 13-2 – Des référentiels agronomiques et des indicateurs pour la pratique agricole : comment faire face à la diversité des situations dans un contexte de transitions ? – Décembre 2023

Revue à comité de lecture et en accès libre éditée par l'Association Française d'Agronomie sous le numéro ISSN 1775-4240. Plus d'informations www.agronomie.asso.fr/aes

L'AFA est une association à but non lucratif qui publie des travaux en accès libre.

Pour soutenir cette démarche, faites connaître AE&S, adhérez à l'association et faites adhérer votre organisme et vos collègues !



ARTICLE

INDIC, une base de données pour aider à s'orienter dans la jungle des méthodes d'évaluation et indicateurs de la durabilité

Christian Bockstaller *, Emma Tromp *, Elisabeth Hufschmitt *, Frédérique Angevin **

* Université de Lorraine, INRAE, LAE, 68000 Colmar, France

** INRAE, Info&Sols, 45075 Orléans, France

Email contact auteurs : christian.bockstaller@inrae.fr

Résumé

Un foisonnement d'initiatives et de travaux sur des indicateurs, des méthodes et des outils d'évaluation de la durabilité existe aujourd'hui. Il résulte d'un besoin croissant des acteurs de clarifier le concept de durabilité, d'établir des diagnostics initiaux, d'aider à la conception de nouveaux systèmes agricoles et de suivre les progrès de démarche de transition. Le développement de la base INDIC est né de ce constat d'un manque de synthèse et d'outil pour aider les utilisateurs dans le choix, non seulement des méthodes d'évaluation de la durabilité, mais aussi des indicateurs qui leur sont associés. Cet article a pour objectifs de présenter successivement la base INDIC dans sa version 2.1, sa constitution, ses caractéristiques et fonctionnalités au travers de requêtes, puis le cadre de classification des indicateurs pour faciliter leur recherche et enfin une analyse succincte du contenu.

Mots clés : évaluation multicritère, environnement, économie, social, gouvernance, service écosystémique

Abstract

An abundance of initiatives and work on indicators, methods and tools for assessing sustainability can be observed currently. This results from a growing need among stakeholders to clarify the concept of sustainability, to establish initial diagnoses, to help design new farming systems, and to monitor the progress of transition processes. The INDIC database was developed to meet the need for a synthesis and a tool to help users choose not only sustainability assessment methods but also the indicators associated with them. The aim of this article is to present version 2.1 of the INDIC database, its constitution, characteristics and functionalities by means of queries, followed by a framework for classifying indicators to facilitate their search, and finally a brief analysis of its content.

Keywords: multicriteria assessment, environment, economy, social, governance, ecosystem service

Introduction

L'émergence de la problématique environnementale et de la durabilité en agriculture, à la suite de fin des années 80 et surtout la conférence de Rio en 1992, a conduit à des travaux de conception de nouvelles formes d'agricultures pour accompagner la transition agroécologique (Therond et al., 2017). En parallèle s'est rapidement imposé un besoin de méthodes et d'outils d'évaluation de la durabilité pour notamment aider les acteurs à clarifier le concept de durabilité au travers de critères d'évaluation (Zahm et al., 2015) afin d'établir des diagnostics initiaux, d'aider à la conception de nouveaux systèmes agricoles et de suivre les progrès de démarches de transition (Lairez et al., 2015). Ce constat établi de manière récurrente s'est traduit par un foisonnement d'initiatives et de travaux sur des indicateurs permettant de renseigner ces critères de durabilité. Il en a résulté une multiplication de propositions d'indicateurs traitant d'une thématique particulière, comme par exemple la qualité de l'eau avec les soldes azotés, l'érosion avec le taux de couverture de sol ou le modèle USLE¹ (Stone & Hilborne, 2000). En parallèle, l'aspect fondamentalement multicritère de la durabilité a conduit à des listes d'indicateurs plus ou moins bien structurées grâce à un cadre conceptuel et présentant des niveaux d'agrégation variables (Bockstaller et al., 2015).

En conséquence, il est apparu un besoin majeur de clarification de cette offre pléthorique et multiforme, découlant de travaux de la recherche et développement menés dans l'urgence et souffrant d'un manque de recul méthodologique. Les articles de revue se succèdent ainsi depuis les années 2000 (Bockstaller et al., 2009 ; Lairez et al., 2015 ; Latruffe et al., 2016 ; Soulé et al., 2021 ; van der Werf & Petit, 2002). En parallèle s'est créé dans les années 2000 en France un collectif multipartenarial, autour d'INRAE et d'Agro-Transfert Ressources et Territoires, nommé PLAGE², pour mettre à disposition des multiples acteurs engagés dans la problématique environnementale des ressources et une aide au choix de méthodes d'évaluation (Surleau-Chambenoit et al., 2013). Cette initiative, mise en place entre 2007 et 2014 avec des financements Casdar et Onema (Ecophyto), s'est poursuivie entre 2015 et 2019 dans le cadre du RMT³ Erytage⁴ (Bockstaller & Emonet, 2015). Dans tous les cas, ces travaux de revue et de recensement de méthodes sont restés centrés sur les méthodes d'évaluation et ne sont que très peu descendus au grain des indicateurs à la base de celles-ci.

Le développement de la base INDIC est né de ce constat d'un manque de synthèse et d'outil pour aider les utilisateurs dans le choix, non seulement des méthodes d'évaluation de la durabilité, mais aussi des indicateurs qui leur sont associées. INDIC résulte du travail mené dans une succession de projets⁵. Cet article a pour objectifs de présenter successivement la base INDIC dans sa version 2.1, sa constitution, ses caractéristiques et fonctionnalités au travers de requêtes, puis le cadre de classification des indicateurs pour faciliter leur recherche et enfin une analyse succincte du contenu de la base de données.

Présentation de la base INDIC

Utilisateurs

INDIC est destinée à des chercheurs, à des ingénieurs de recherche et développement ayant quelques connaissances en Access.

¹ USLE : Universal Soil Loss Equation

² PLAGE : Plate-forme d'évaluation AGri-Environnementale

³ RMT : réseau mixte technologique ; GIS : groupement d'intérêt scientifique

⁴ ERYTAGE : Evaluation de la durabilité des Territoires et sYstèmes AGricolES

⁵ . Le projet IMPACTS du programme Agriculture et Développement Durable (2005-2008) a été les prémices d'INDIC avec un premier recensement de méthodes et indicateurs dans un fichier Excel (Rosnoble et al., 2006). Puis, plusieurs projets dans le cadre du GIS Grandes Cultures (2012-2015) ont conduit à une première version de la base qui a été mise à disposition⁵ (Thomas-Delille, 2015). Enfin, le projet Ecophyto E-DISC (2021-2024) a permis de consolider ces acquis, avec un travail de révision complet de la base de données et, notamment, de la classification des indicateurs ainsi qu'une amélioration des fonctionnalités de la base (Hufschmitt, 2021 ; Tromp, 2023).

Sélection des méthodes et indicateurs

Un premier travail de choix des méthodes s'est fait à partir d'une recherche bibliographique et sur internet par Rosnoble et al. (2006) qui a abouti à une première sélection de plus de 150 méthodes qui a ensuite été épurée d'articles trop peu précis ou trop peu en lien avec le secteur agricole. Les travaux du collectif PLAGE, ceux au sein du groupe « évaluation multicritère » du GIS et du RMT Erytage ont permis de compléter cette sélection, en plus des recherches bibliographiques faites au fil de l'eau. Enfin, la revue systématique de Soulé et al. (2021) a permis de compléter la base avec des méthodes pour lesquelles nous avons une description claire des indicateurs et qui n'était pas encore dans la base. On peut citer les méthodes IDEAv.4 (Zahm et al., 2019), MOSAICA (Chopin et al., 2015), SIMBA (Tixier et al., 2008), ou SOSTARE (Paracchini et al., 2015). Des revues d'indicateurs ont été ajoutées pour élargir la gamme disponible sur des thématiques qui ont fait l'objet d'un effort particulier en matière de développement d'indicateurs, comme pour la thématique des pesticides.

Caractéristiques générales

La base de données INDIC est sous format Access (Microsoft®). Dans sa version 2.1, elle occupe 342 Mo. Les interfaces sont en anglais. Cependant, pour les méthodes françaises, la description des indicateurs a été conservée en français.

Interface

L'utilisateur a accès à une interface avec un formulaire général qui lui permet de consulter les méthodes (Figure 1a) mais aussi d'entrer de nouvelles méthodes. A la fin du formulaire, se trouve la table des indicateurs de la méthode (Figure 1b). Ces formulaires renvoient à un ensemble de tables dont les tables « indicators » et « methods ».

Requêtes

L'utilisateur a accès en bas de formulaire à quatre fonctions de recherche (Figure 1) : une recherche par descripteur des méthodes, une par mot clé des indicateurs, une qui permet de gérer les ambiguïtés dans le classement des indicateurs. Par ailleurs, l'utilisateur a accès à un certain nombre de requêtes programmées lui permettant de réaliser des sélections et des synthèses d'information :

- 29 requêtes de comptage donnant, par exemple, le nombre de méthodes par pays, par zone climatique, par type de concepteur, ... mais aussi le nombre d'indicateurs par dimension de la durabilité, par critères, selon leur nature quantitative/qualitative, etc.
- Pour les dimensions économique, environnementale et sociale, cinq requêtes, dont le nombre d'indicateurs par critère ou sous-critères.
- 18 requêtes de recherche : quelle méthode pour une année, un auteur, ou un pays, etc.

Le chapitre « analyse de la base » montre des exemples d'utilisation de certaines de ces requêtes (Ex : Tableaux 2 à 4).

a)


INDIC 2.1: Methods and Reviews Sheets

PART 1 : GENERAL DATA ON THE METHOD OR REVIEW

Method or Review name: Method or Review number: —If it is a method : Mxxx
If it is a review : Rxxx

Reference: Previous number:

Type of reference: Seminal work:

Origin: PDF file: 

Year of publication: Multithematic:



Identifiers (DOI, ISBN): Comment:

Webpage:

Before starting, read the user guide [User guide](#)

[Research item in method](#) [Research indicator by key word](#) [Research ambiguities](#) [Research indicators by sub-criteria](#) [Link to criteria_subcriteria](#)

This project was financed by the GIS Grande Culture à Hautes Performances Économiques et Environnementales. It was also financed by the OFV in the framework of the Ecophyto project "E-DISC". Authors: Thomas-Delille Emilie, Feschet Pauline, Schneller Chloé, Bockstaller Christian, 2015. Update: Hufschmitt Elisabeth, Bockstaller Christian, 2021-2023, Tramp Emma 2023. With scientific support of Frederic Zahm,

  Pour plus d'informations, contactez : Christian Bockstaller : christian.bockstaller@inrae.fr [Exit INDIC](#)

b)

INDIC 2.1: Methods and Reviews Sheets

PART 3 : INDICATOR'S DATA

Indicator number	Indicator name	Code sub-criteria	Qualitative/Quantitative	Unit	Indicator type	Calculation or variables description
M001_022	Démarche de qualité	ECO03_02	No details	Score	causal	Liée au territoire (AOC, IGP...), liée au process (label rouge, norme ISO 14000,
M001_027	Valorisation par filières courtes	ECO07_04	Quantitative	Score	causal	Vente à proximité, Valeur des ventes directes par rapport au chiffre d'affaire
M001_030	Contribution à l'emploi	ECO12_01	Quantitative	Score		Surface / UTH, création d'emploi sur l'exploitation dans les 5 dernières années
M001_045	Efficacité du processus productif	ECO13_05	Quantitative	Score		(Produit - Intrants) / Produit
M001_041	Taux de spécialisation économique	ECO15_01	Quantitative	Score		Part du chiffre d'affaire de la plus importante activité, part du chiffre d'affaire
M001_040	Viabilité économique	ECO15_02	Quantitative	Score		VE = (EBE - BF) / UTH non-salarisé (BF = besoin de financement)
M001_028	Autonomie et valorisation des ressources locales	ECO16_01	Quantitative	Score		Autonomie vis-à-vis des aliments, des engrais organiques, des animaux (hors r
M001_042	Autonomie financière	ECO16_02	Quantitative	Score		Dépendance financière (DF) : DF = (Somme Annuités + frais financiers CT) / EB
M001_043	Sensibilité aux aides du premier pilier de la PAC (Politique A	ECO16_02	Quantitative	Score		Σ aides / EBE
M001_032	Pérennité probable	ECO17_04	Qualitative	Score		Probabilité de l'existence de l'exploitation dans 10 ans
M001_044	Transmissibilité du capital	ECO21_01	Quantitative	Score		Capital / UTH non salariés sauf associés
M001_007	Dimension des parcelles	ENV05_01	Quantitative	Score	causal	Surface maximale d'unité spatiale de même culture (ha) ; dimension moyenne
M001_012	Gestion des surfaces fourragères	ENV05_03	Quantitative	Score	causal	Surface fauchée et pâturée, surface des prairies permanentes (% de la SAU),
M001_010	Contribution aux enjeux environnementaux du territoire	ENV05_04	Qualitative	Score	causal	Respect d'un cahier des charges territorialisé suivant le % de la SAU
M001_009	Zones de régulation écologique	ENV05_08	Qualitative	Score	causal	Surface de régulation écologique, présence d'éléments paysagers (points d'ea

Before starting, read the user guide [User guide](#)

[Research item in method](#) [Research indicator by key word](#) [Research ambiguities](#) [Research indicators by sub-criteria](#) [Link to criteria_subcriteria](#)

This project was financed by the GIS Grande Culture à Hautes Performances Économiques et Environnementales. It was also financed by the OFV in the framework of the Ecophyto project "E-DISC". Authors: Thomas-Delille Emilie, Feschet Pauline, Schneller Chloé, Bockstaller Christian, 2015. Update: Hufschmitt Elisabeth, Bockstaller Christian, 2021-2023, Tramp Emma 2023. With scientific support of Frederic Zahm,



  Pour plus d'informations, contactez : Christian Bockstaller : christian.bockstaller@inrae.fr [Exit INDIC](#)

Figure 1 : Interface de saisie et de consultation de la base INDIC 2.1 : a) pour les méthodes, b) pour les indicateurs (en bas de formulaire).

Classification des indicateurs

Présentation générale

Une grille de classification des indicateurs a été proposée pour les quatre dimensions de la durabilité, environnementale, économique, sociale et de gouvernance, si on se réfère au cadre SAFA développé au niveau de la FAO⁶ en 2013 (Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO), 2013). Elle a été complétée par l'expertise agronomique des auteurs sur les pratiques agricoles, par celle de F. Zahm (INRAE) pour la dimension économique et par la revue de Janker & Mann (2020) pour la dimension sociale. Elle a aussi été améliorée durant le travail de classification des indicateurs se trouvant dans la base, notamment pour la dimension de gouvernance. En parallèle, nous avons utilisé un cadre conceptuel intégrateur construit en développant un réseau causal détaillé (Bockstaller et al., 2023, dans ce numéro). Ce cadre, développé pour la dimension environnementale a ensuite été repris pour les autres dimensions de

⁶ Food and Agriculture Organization of the United Nations

la durabilité. Ainsi, nous distinguons plusieurs niveaux de manière hiérarchique :

- Au premier niveau très général, une division est faite entre critères portant sur les causes (ou les moyens) et les critères sur les effets (ou les impacts) (van der Werf & Petit, 2002).
- Au second niveau, les critères portant sur les causes traitent :
 - du contexte (ou caractéristiques du milieu),
 - des pratiques des acteurs,
 - du fonctionnement du système.
- À ce même niveau, les critères portant sur les effets sont :
 - Les indicateurs d'émission/consommation de ressources/d'état et d'impact pour la dimension environnementale ou de résultats pour la dimension économique (rentabilité, par exemple), ou encore d'impact pour les dimensions sociale et de gouvernance. Ce niveau englobe les critères qui correspondent souvent aux critères de la grille SAFA (FAO, 2013) et répondent à des objectifs de durabilité (Zahm et al., 2015) ;
 - Les indicateurs de propriétés systémiques qui permettent une lecture transversale à celle des objectifs de durabilité (Zahm et al., 2015), revus notamment par López-Ridaura et al. (2005). On y retrouve ainsi la productivité, la stabilité, la résilience, l'équité etc.
- Les troisième et quatrième niveaux portent sur les critères et sous-critères de durabilité proprement dits et sont totalement spécifiques par dimension, alors que les premier et second sont assez niveaux communs entre les quatre dimensions de la durabilité. Pour quelques critères, nous avons noté une ambiguïté dans le classement qui est noté dans la table correspondante. Ainsi, le bien-être animal est classé dans le cadre SAFA dans la dimension environnementale, bien qu'il soit placé dans de nombreuses méthodes dans la dimension sociale comme une attente sociétale, comme par exemple dans la méthode IDEA v.4 (Zahm et al., 2019).

Au total, les dimensions environnementale, économique, sociale et de gouvernance présentent respectivement : 34 critères et 205 sous-critères, 21 et 106, 21 et 90, 13 et 29.

Détail des critères par dimension de la durabilité

Les Figures 2, 3, 4, et 5 présentent, pour chacune des dimensions de la durabilité, le positionnement des critères de la grille de classification des indicateurs sur le cadre conceptuel de Bockstaller et al. (2023, dans ce numéro). Pour la dimension environnementale, les critères de pratiques et de milieu ont été gardés regroupés par souci de simplification (voir annexes). La liste des critères environnementaux est donnée en annexe 1 et les annexes 2 et 3 présentent la liste des sous-critères pour certains de ceux-ci pour donner un aperçu de la résolution dans la classification.

Pour la dimension environnementale, le contexte est décrit, entre autres, par les caractéristiques de milieu. Pour les dimensions économique et sociale, un critère de contexte général plus en amont a été distingué. Par exemple pour la dimension sociale, il s'agit de critères spécifiques de contexte démographique et de conditions d'accès aux infrastructures. Pour les dimensions de gouvernance et économique, nous avons distingué plusieurs critères de pratiques. Par exemple, pour la gouvernance, le critère « Ethique/objectifs » porte sur l'énoncé préalable d'objectifs, de code de conduite, etc., dans l'entreprise ou sur des pratiques de vérification des performances de l'entreprise par exemple. Par ailleurs, il y a toujours deux ou trois critères d'état et de fonctionnement du système qui incluent les interactions entre ses éléments. Pour la gouvernance, les trois critères portent sur le fonctionnement *via* les interactions institutionnelles entre acteurs (ex : corruption).

Au niveau des propriétés systémiques, le nombre de critères est plus variable avec une propriété identifiée pour la dimension environnementale, deux pour la gouvernance, cinq pour la dimension sociale et six pour la dimension économique. Pour les objectifs, la gouvernance en présente trois

(ex : relations institutionnelles), la dimension sociale, quatre (ex : sécurité alimentaire), la dimension économique, cinq (produits et services), et la dimension environnementale, six (ex : (protection des sols). Pour les dimensions sociale et économique, nous avons distingué deux niveaux et notamment un niveau aval de contribution aux impacts sur la société. Pour la dimension économique, nous avons même distingué quatre niveaux, les charges et coût qui vont déterminer les performances économiques qui construisent le revenu et enfin, la contribution au développement économique de la région.

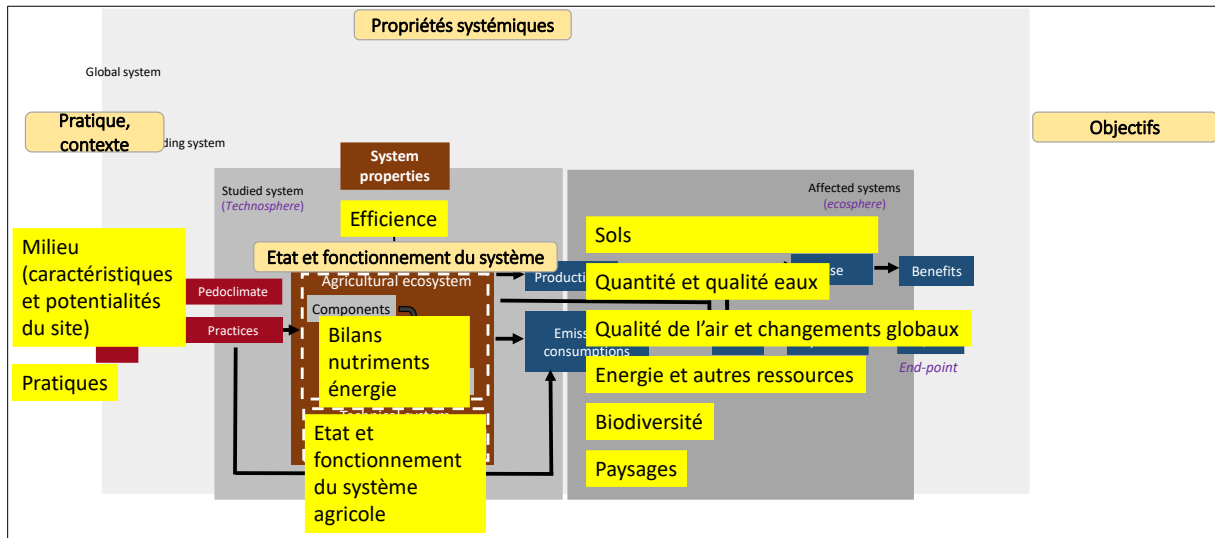


Figure 2 : Positionnement des critères de classification des indicateurs environnementaux sur le cadre conceptuel de Bockstaller et al. (2023, dans ce numéro). Les critères « milieu » et « pratiques » n'ont pas été détaillés par souci de simplification.

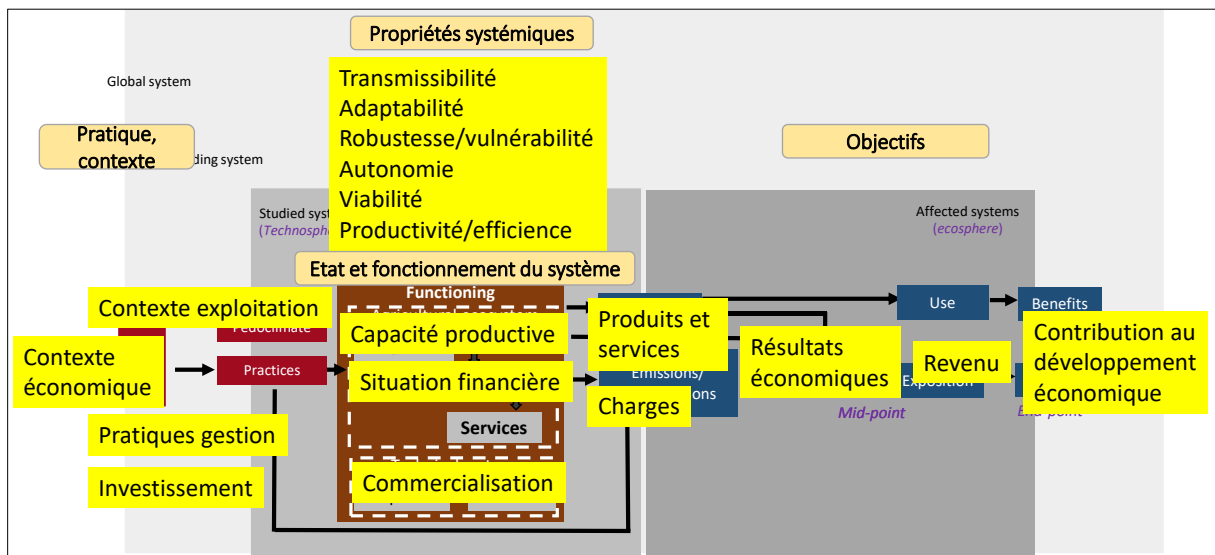


Figure 3 : Positionnement des critères de classification des indicateurs économiques sur le cadre conceptuel de Bockstaller et al. (2023, dans ce numéro).

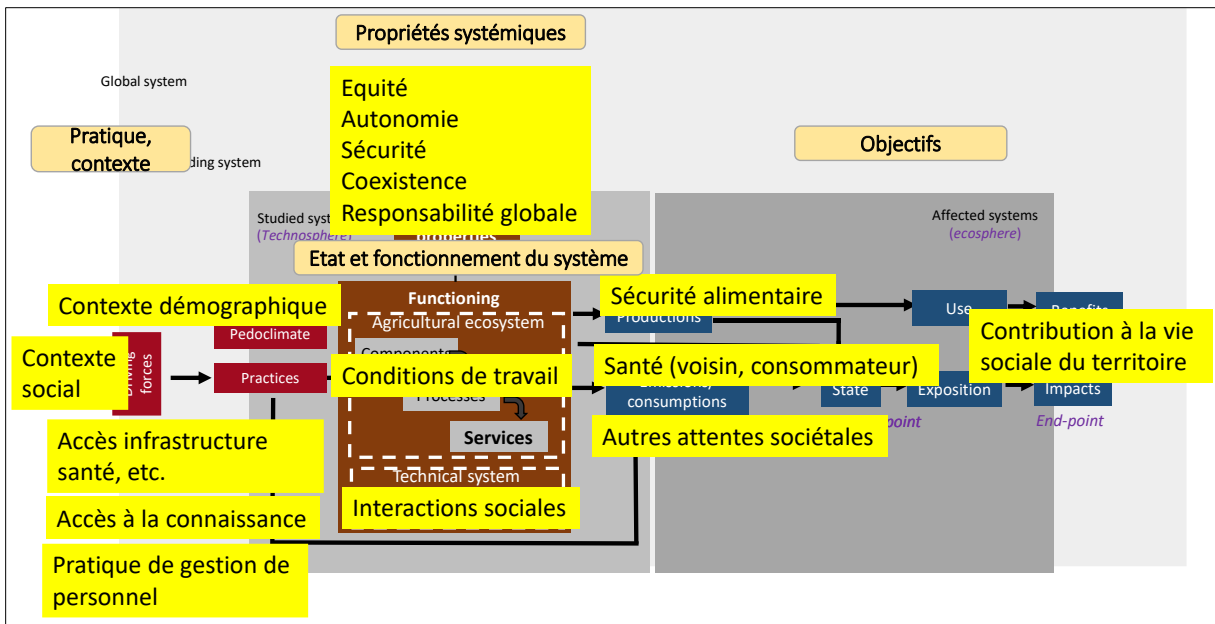


Figure 4 : Positionnement des critères de classification des indicateurs sociaux sur le cadre conceptuel de Bockstaller et al. (2023, dans ce numéro).

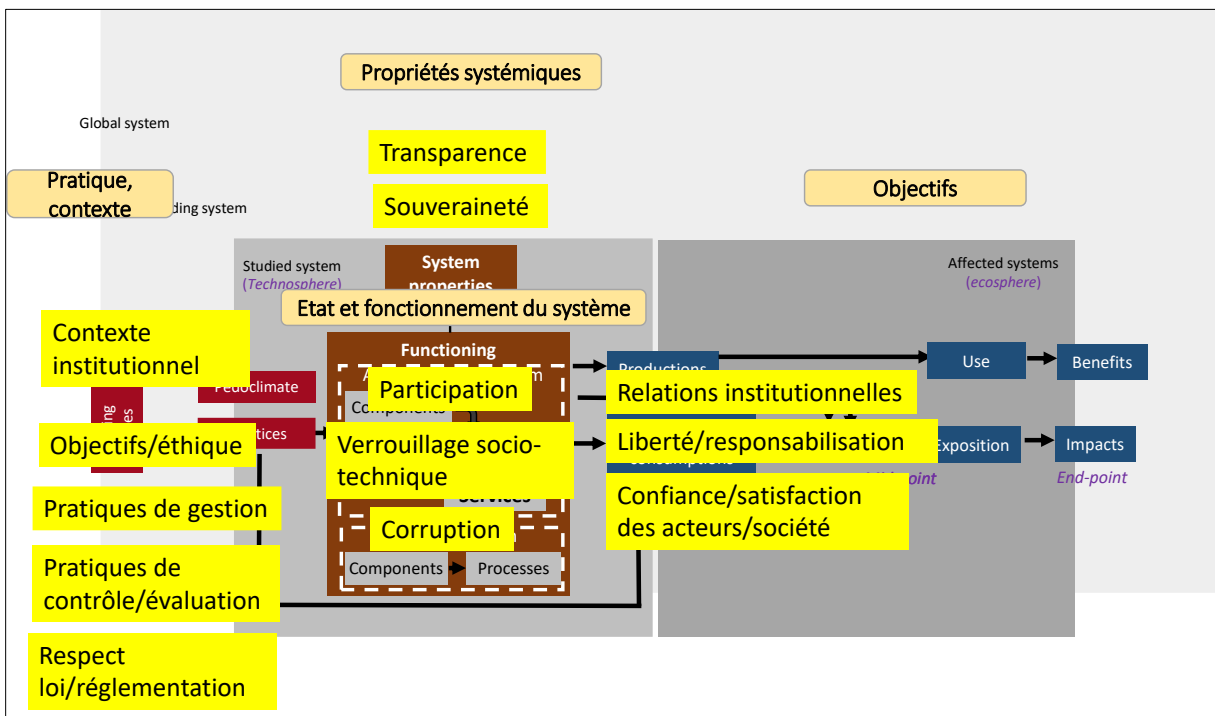


Figure 5 : Positionnement des critères de classification des indicateurs de gouvernance sur le cadre conceptuel de Bockstaller et al. (2023, dans ce numéro).

Exemple de valorisation et d'analyse du contenu de la base

La partie qui suit a pour objectif de présenter le contenu de la base et quelques exemples de valorisation et d'analyse, en partant d'une vue d'ensemble, puis d'une analyse des critères les plus pourvus en indicateurs dans les méthodes d'évaluation. Enfin une analyse plus détaillée est réalisée pour deux thématiques, à l'instar de qui avait déjà été fait sur l'azote (Bockstaller et al., 2015) :

- Les produits phytosanitaires et leurs impacts,
- Les émissions gaz à effet de serre (GES) et le changement climatique.

Données générales

La Base INDIC 2.1 contient 194 méthodes dont 49 pour la France, 18 pour l'Italie, 12 pour les USA et 11 pour le Royaume Uni et les Pays Bas. Six revues ont été ajoutées à la version précédente d'INDIC (Thomas-Delille, 2015) : trois pour l'azote (U Buczko & Kuchenbuch, 2010; CORPEN, 2006; Makowski et al., 2009), une pour les produits phytosanitaires (Keichinger et al., 2013), une sur le phosphore (U Buczko & Kuchenbuch, 2007) et une autre la dimension économique (Wilson et al., 2005). Cela nous amène à plus de 4900 indicateurs décrits, dont 59 % d'indicateurs environnementaux (Tableau 1).

Tableau 1 : Répartition des indicateurs de la base INDIC par dimension de la durabilité

Dimension	Nombre d'indicateurs	%
Environnement	2895	58.9%
Economie	1214	24.7%
Social	722	14.7%
Gouvernance	85	1.7%
Total	4916	100.0%

Analyse par critère et sous-critère

Dans cette partie, nous présentons les indicateurs les plus fréquents parmi les 194 méthodes d'évaluation de la durabilité. Sur l'ensemble de la base, la requête a fait sortir neuf critères environnementaux et un critère social (« conditions de travail et qualité de vie »), ce qui est logique compte tenu du nombre bien plus important de critères et d'indicateurs environnementaux (Tableau 1).

Dimension environnementale

Pour cette dimension, quatre thèmes se retrouvent dans le top 10 (Tableau 2) : biodiversité, GES, pesticides et érosion des sols. Ceci diffère un peu de l'ordre présenté dans la revue de Soulé et al. (2021). Plus précisément, le sol, les pesticides, la qualité de l'air et la biodiversité apparaissent en critère alors que l'érosion et les GES sont en sous-critères. L'absence du critère fertilisation peut s'expliquer par une division par élément (N, P, K, oligo-éléments et organique) dans INDIC. Pour les sous-critères, c'est la consommation d'énergie qui vient en premier, suivie des émissions de GES. Le sous-critère bilan azoté est sur le podium, ce qui avait déjà été montré par Bockstaller et al. (2015) et Langeveld et al. (2007). La présence de deux sous-critères, la diversité végétale et la quantité d'infrastructures agroécologiques, deux déterminants importants de la biodiversité, est à noter (Sirami et al., 2019).

Dimension économique

Si les critères de résultats technico-économiques et productivité/efficacité viennent en tête, la

présence des critères de contexte et de pratiques de gestion est à relever (Tableau 3). Au niveau des sous-critères, rendement et productivité viennent en tête. On retrouve aussi les critères résultats d'exploitation (dont l'Excédent Brut d'Exploitation, utilisé dans 10 méthodes) et la marge brute. Les critères contribution au développement économique et contribution à l'emploi sont aussi présents dans le top 10.

Dimension sociale

Pour la dimension sociale, le critère condition de vie et qualité du travail arrive très largement en tête, une domination bien plus nette que celle du critère majeur dans le cas des deux autres dimensions (Tableau 4). Ceci se traduit par la présence de cinq sous-critères liés dans le top 10 des sous-critères : temps de travail, répartition du temps de travail, difficultés et pénibilité du travail, satisfaction-épanouissement, évaluation générale ou autre. Ce dernier est le seul sous-critère « fourre-tout » qui est apparu dans les tops 10. Dans tous les cas, cette place prépondérante du critère sur le temps de travail et la qualité de vie a aussi été trouvée par Janker & Mann (2020).

Dimension 'gouvernance'

Le nombre réduit d'indicateurs de gouvernance fait que nous ne traiterons pas en détail de cette dimension. Les trois critères les plus représentés sur les 13 critères inclus dans INDIC sont : respect des lois/règlementation (n=19), participation (n=18), éthique/objectifs (n=10) ; ils représentent à eux-trois presque 50 % des indicateurs.

Tableau 2 : Top 10 des critères et sous-critères environnementaux ayant le plus d'indicateurs (pour les méthodes)

Code critère	Critères	Nombre d'indicateurs	Code sous-critère	Sous-critères	Nombre d'indicateurs
ENV26	Sol	272	ENV30_01	Consommation d'énergie totale / fossile	109
ENV05	Gestion des espaces agricoles	252	ENV29_01	Emissions de CO2, CH4, N2O	106
ENV07	Gestion des productions végétales et animales	190	ENV25_01	Bilan azoté	76
ENV29	Qualité de l'air et changements globaux	189	ENV26_03	Érosion / ruissellement	70
ENV28	Qualité des eaux souterraines et de surface	179	ENV07_04	Diversité végétale (indice, type de culture)	61
ENV32	Biodiversité	166	ENV05_08	Quantité d'infrastructures agro-écologiques et d'éléments paysagers	56
ENV14	Pesticides	163	ENV05_03	Occupation des sols et surfaces en production végétale	55
ENV30	Energie	153	ENV28_01	Transferts de NO3	51
ENV25	Bilan	149	ENV26_09	Fertilité chimique du sol (matière organique)	51

Tableau 3 : Top 10 des critères et sous-critères économiques ayant le plus d'indicateurs (pour les méthodes).

Code critère	Critères	Nombre d'indicateurs	Code sous-critère	Sous-critères	Nombre d'indicateurs
ECO10	Résultats technico-économiques	172	ECO13_01	Rendement	56
ECO13	Productivité/efficacité	147	ECO13_03	Productivité (évaluation générale)	44
ECO08	Produits et services	116	ECO08_05	Valeur des productions (et aides)	38
ECO02	Contexte exploitation	110	ECO12_01	Contribution à l'emploi	38
ECO09	Charges	85	ECO16_02	Dépendance / Autonomie financière	36
ECO16	Dépendance / Autonomie	78	ECO02_02	Disponibilité et besoin en main d'œuvre	35
ECO07	Approvisionnement, production et commercialisation	73	ECO10_06	Résultat d'exploitation	31
ECO12	Contribution au développement économique	70	ECO13_05	Efficiences économiques	30
ECO06	Situation financière	57	ECO10_01	Marge brute	28
ECO03	Pratiques de gestion	44	ECO16_01	Dépendance / Autonomie technique	28

Tableau 4 : Top 10 des critères et sous-critères sociaux ayant le plus d'indicateurs (pour les méthodes).

Code critère	Critères	Nombre d'indicateurs	Code sous-critère	Sous-critères	Nombre d'indicateurs
SOC10	Conditions de travail et qualité de vie	155	SOC07_01	Qualification de l'exploitant	32
SOC12	Alimentation	90	SOC10_10	Satisfaction-épanouissement	31
SOC07	Disponibilité des connaissances et niveau de qualification	82	SOC03_01	Accès aux infrastructures élémentaires (habitation, eau, hygiène, santé, etc.)	27
SOC09	Pratiques de gestion de personnel	71	SOC12_01	Quantités aliments	27
SOC03	Conditions de vie	61	SOC10_11	Evaluation générale ou autre	23
SOC11	Interactions sociales	53	SOC10_04	Difficultés, pénibilité du travail	22
SOC15	Contribution à la vie sociale du territoire	40	SOC10_03	Répartition du temps de travail	20
SOC02	Contexte démographique	32	SOC11_04	Interactions avec reste de la société	18
SOC13	Santé et bien-être (voisins, consommateurs, etc.)	26	SOC10_01	Temps de travail	18
SOC19	Equité	22	SOC07_04	Effort de formation	18

Typologie par thématique générale autour de la durabilité

Pour entrer un peu plus dans le détail du contenu de la base, nous avons étudié l'ensemble de critères en lien avec une thématique générale en les organisant selon une chaîne causale depuis les critères de cause, contexte et pratiques agricoles, fonctionnement du système et effets. Puis pour les indicateurs environnementaux, nous les avons classés selon la typologie de Bockstaller et al. (2015) en indicateurs de cause, d'effet prédictif, d'indicateur mesuré d'effet ou en indicateur combiné (mesures-modèle prédictif) d'effet.

Pesticides

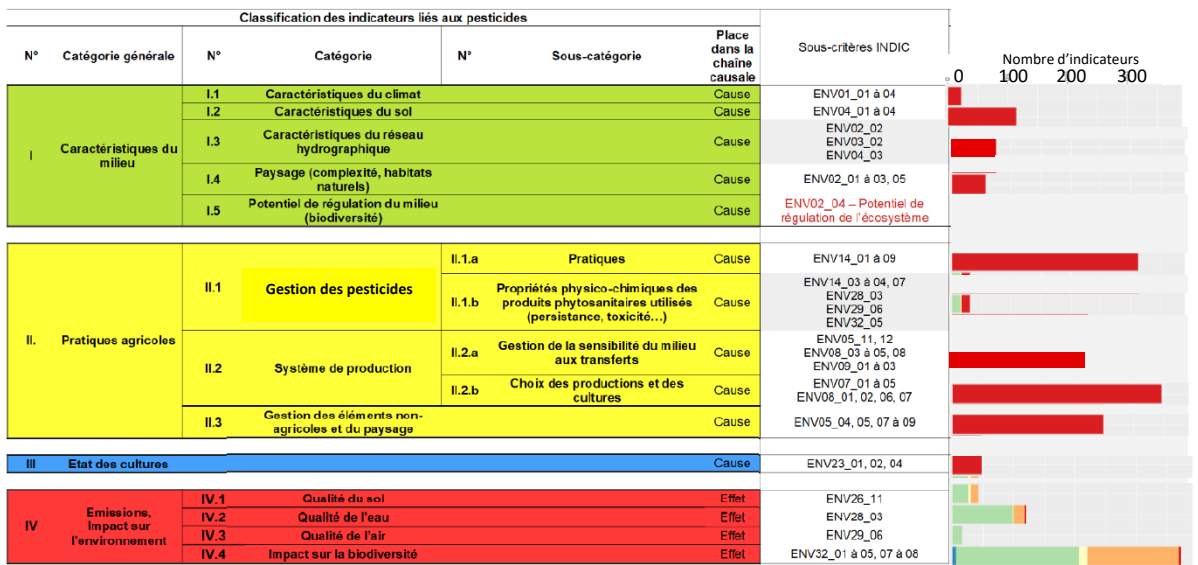


Figure 6 : Typologie et nombre d'indicateurs par catégorie pour la thématique des pesticides. Les barres rouges, saumon, jaunes, vertes et bleues représentent respectivement des indicateurs de cause, les indicateurs mesurés d'effet, les types indéterminés, les indicateurs d'effet prédictifs et les combinés mesurés-prédictifs. La signification des codes des sous-critères est à trouver en annexe 1 et dans la base INDIC.

La Figure 6 présente une typologie pour la thématique des pesticides structurée en cinq grandes catégories de cause liées au milieu et cinq liées aux pratiques, une catégorie liée à l'état du système et quatre aux effets sur le sol, l'eau, l'air et la biodiversité. Chacune de ces catégories correspond à

un ou plusieurs sous-critères. Les catégories les plus fournies en indicateurs sont la biodiversité, la gestion des productions et cultures, la gestion des pesticides, la gestion des éléments non-agricoles et du paysage et la sensibilité du milieu aux transferts. A l'autre extrémité, il y a très peu d'indicateurs sur le climat, sur les propriétés des molécules, sur la qualité de l'air, voire aucun sur le potentiel de régulation du milieu. La catégorie 'état des cultures' n'est pas très fournie non plus. Pour la biodiversité, il est à noter qu'une majorité des indicateurs sont des indicateurs d'effet mesurés qui reposent donc sur des comptages. Ils intègrent en fait différents processus dont l'impact des pesticides, mais pas seulement, et ne donnent pas un lien direct d'effet des pesticides.

Le fait qu'il y ait beaucoup d'indicateurs de pratiques ou de sensibilité du milieu dans les méthodes d'évaluation de la durabilité n'est pas étonnant car il s'agit des principaux facteurs à l'origine des impacts environnementaux des pesticides. L'importance du choix des cultures, comme déterminant de l'intensité de l'utilisation des pesticides, a été montrée récemment (Guinet et al., 2023). Cette première analyse quantitative met en évidence des manques pour certaines catégories. Par ailleurs, pour aller plus loin que cette analyse quantitative, il faudrait réaliser une analyse qualitative qui pourrait conduire à une aide au choix comme cela avait été réalisé dans le projet GUIDE (Keichinger et al., 2013). Cela impliquerait une description des impacts considérés, des échelles, des variables prises en compte, des méthodes de calcul, etc.

Gaz à effet de serre

a)

Classification des indicateurs liés aux GES				Sous-critères de l'INDIC par type d'émissions GES							
N°	Catégorie générale	N°	Catégorie	N°	Sous-catégorie	Place dans la chaîne causale	CO2		CH4	N2O	Stock C
							Directes	Induites			
I.	Caractéristiques du milieu	1.1	Caractéristiques du climat			Cause			ENV01_01 à 04		
		1.2	Caractéristiques du sol			Cause				ENV04_02, ENV03_03	ENV04_02
II.	Pratiques agricoles	II.1	Pratiques de Cultures	II.1.a	Caractéristiques des plantes	Cause	ENV17_04, ENV21_04*			ENV07_03, ENV17_01	ENV07_03, ENV17_01, 04
				II.1.b	Gestion des cultures	Cause	ENV07_01, ENV08_02 à 05, ENV20_02, ENV21_02, 03, 06	ENV07_01		ENV20_02	ENV08_02 à 05
				II.1.c	Gestion des intrants	Cause		ENV10_01 à 05, ENV11_01 à 04, ENV12_01 à 04, ENV13_01 à 04, ENV14_01 à 08		ENV10_01 à 05	ENV10_01 à 05, ENV11_01 à 04, (ENV12_01 à 04,) (ENV13_01 à 04,) ENV14_01 à 08
				II.1.d	Gestion des résidus et du sol	Cause	ENV08_07 à 09, ENV09_01, 02			ENV08_07 à 09, ENV09_01 à 03, 05	
		II.2	Pratiques d'Elevage	II.2.a	Conduite du troupeau	Cause		ENV07_06	ENV07_06, (07), ENV15_02, 04	ENV07_06	
				II.2.b	Alimentation et traitements	Cause			ENV18_01 à 06, (ENV19_01 à 06)	ENV18_01 à 06	
				II.2.c	Logement et parcours	Cause	ENV16_03		ENV16_03	ENV17_02	
				II.2.d	Gestion des effluents	Cause			ENV16_02, ENV21_05*		
		II.3	Gestion des éléments non-agricoles et du paysage	Cause	ENV05_01 à 03, 07, 08, 11, ENV06_01, 02			ENV05_11	ENV05_02, 03, 07, 08, 11, ENV06_01, 02		
		III.	Etat des cultures				Cause	ENV23_04			ENV23_03, 04
IV	Consommation d'énergie				Effet	ENV30_01 à 03, 04*, 05, 06					
V.	Emissions	V.1	Emissions			Effet	ENV20_01				
		V.2	Stock de C			Effet				ENV29_02	

b)

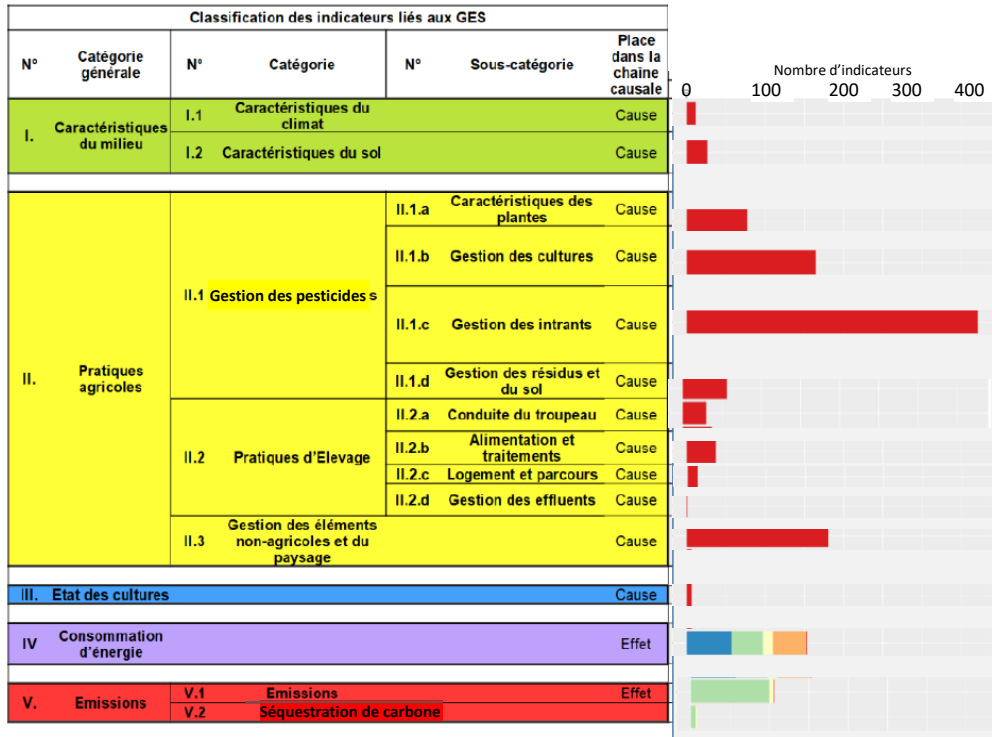


Figure 7 : Typologie des indicateurs pour la thématique gaz à effet de serre (a) et nombre d'indicateurs par catégorie (b). Les barres rouges, saumon, jaunes, vertes et bleues représentent respectivement des indicateurs de cause, les indicateurs mesurés d'effet, les types indéterminés, les indicateurs d'effet prédictifs et les combinés mesurés-prédictifs. La signification des codes des sous- critères est à trouver en annexe 1 et dans la base INDIC.

Pour les gaz à effet de serre, la catégorie la plus représentée est la gestion des intrants (Figure 7b) qui regroupe plusieurs sous-critères (Figure 7a). Puis viennent la gestion des éléments non agricoles et la gestion de cultures et ensuite les critères 'consommation d'énergie' et émission de GES. La gestion des effluents, la séquestration du carbone, l'état des cultures sont les moins pourvus en indicateurs, suivis par les critères 'climat' et 'logement et parcours'. La place prédominante de la 'gestion des intrants' peut s'expliquer par le nombre de sous-critères entrant cette catégorie : tous ceux liés à la fertilisation et aux produits phytosanitaires en incluant la production et le transport car ils sont sources d'émission de gaz à effet de serre (Pellerin et al., 2013). En revanche, la séquestration n'est quasiment pas abordée par les méthodes. Cela veut dire qu'une majorité d'entre elles ne traite que des émissions de gaz à effet de serre et non du bilan carbone qui doit comprendre la séquestration voire l'albédo du sol et des couverts végétaux (Soulé et al., 2023). Ces auteurs ont aussi mis en évidence la corrélation logique existant entre les émissions de GES et la consommation d'énergie fossile sur un jeu de données d'exploitations de grandes cultures.

Discussion

Le travail de qualification des méthodes peut être comparé à celui présenté dans d'autres revues par la présence de descripteurs communs tels que le pays, le type de production, et les finalités, etc. La partie sur les indicateurs est à notre connaissance unique. La classification en une grille à quatre niveaux est originale, particulièrement grâce aux deux derniers niveaux portant sur les critères et sous-critères. Ceux-ci en plus comprennent des critères de contexte et pratiques et de fonctionnement du système, en plus des critères classiques d'objectifs (ex ; protection des sols, performance économique, etc.) et de propriétés systémiques (ex : résilience, stabilité, etc.). Ils permettent en effet de classer plus finement les indicateurs que ce qui est fait dans le cadre SAFA, mondialement reconnu (FAO, 2013). Les exemples de sortie illustrent le potentiel d'utilisation de la base par des utilisateurs potentiels de méthodes d'évaluation cherchant à s'orienter dans la jungle

des méthodes. D'autres analyses pourraient être conduites en considérant les différentes échelles spatiales. Par ailleurs, la typologie pourra être réitérée pour d'autres thématiques générales de la durabilité, telles la biodiversité, la rentabilité, la qualité de vie. Cela permettrait de fournir un état de l'art sur les indicateurs disponibles, les redondances et les manques.

Ce travail est centré sur les méthodes d'évaluation de la durabilité qui sont, par essence, multicritères. Nous avons ajouté un certain nombre de méthodes monocritères, 18 au total, dont celle sur le modèle Syst'N (Parnaudeau et al., 2012) ou la méthode Biotex sur la biodiversité (Manneville et al., 2014). Il reste à faire une revue de la littérature plus complète pour saisir de manière exhaustive l'ensemble des indicateurs. Des travaux tels que ceux sur des indicateurs prédictifs de séquestration de carbone utilisant, par exemple, SIMEOS-AMG (Bouthier et al., 2014) ou encore un indicateur récent d'impact des systèmes de culture sur la biodiversité (Soulé et al., 2023) seraient à ajouter parmi des méthodes monocritère.

Ainsi, la base INDIC en l'état donne une vue assez large de la diversité des indicateurs mais non de manière exhaustive. En fait, les méthodes d'évaluation multicritère utilisent souvent les indicateurs les plus simples alors que des indicateurs prédictifs comme ceux dans les revues pour l'azote, le phosphore ou les pesticides (U Buczko & Kuchenbuch, 2007 ; Uwe Buczko & Kuchenbuch, 2010 ; Keichinger et al., 2013) ne sont pas tous utilisés par ces méthodes car demandant plus d'investissement. Par ailleurs, la grille de classification, même si elle contient certaines thématiques, sans indicateur (au total 28 sur 424 soit 6,6 % voir la liste en Annexe 4) souffre certainement encore de manques. Les thématiques manquantes identifiées par Soulé et al. (2021) telles que les microplastiques ou les pollutions par les antibiotiques ne sont pas non plus présentes, ni de manière explicite les services écosystémiques. Ceci ressort des Figures 6 et 7b, qui montrent que les critères de régulations naturelles ou de séquestration de carbone, tous deux en fait des services écosystémiques, n'étaient quasiment pas pourvus en indicateurs.

Par ailleurs la liste des critères et sous-critères de la grille de classification peut se discuter. Nous avons déjà évoqué le cas du critère 'bien-être animal' que nous avons mis dans la dimension environnementale comme dans SAFA (FAO, 2013) mais qui peut être mis dans la dimension sociale comme c'est le cas dans la méthode IDEA (Zahm et al., 2019). Nous avons aussi 14 indicateurs liés à l'usage des pesticides qui traitent de la contamination des eaux et qui sont classés dans la dimension environnementale. Cependant, ils traitent aussi de la santé humaine et pourraient figurer dans la dimension sociale. Pour identifier ces difficultés, nous avons créé une table des ambiguïtés qui contient 252 indicateurs pour un total de 4916 indicateurs soit 5,1 %, ce qui reste faible.

Pour ce qui est de l'utilisation, INDIC 2.1 sera mis à disposition sur le site du GIS Grandes Cultures comme la première version. La convivialité a été augmentée par des boutons et formulaires, mais l'utilisation des requêtes se fait par l'interface Access et non par des formulaires plus conviviaux. La base n'a pas fait l'objet d'une co-conception avec de futurs utilisateurs comme préconisé par les ergonomes notamment (Cerf & Meynard, 2006) et des tests d'usage seraient certainement à réaliser. Des pistes d'amélioration sont encore à envisager, notamment l'homogénéisation de la description des indicateurs en une seule langue et la traduction de l'ensemble en français. Enfin, INDIC demande à être enrichie par d'autres méthodes plus récentes. Les indicateurs utilisés dans la plateforme MAELIA (Dardonville et al., 2023) pourraient être introduits. Un travail de ce type est prévu dans le cadre du futur projet européen Transform (2024-2029) sur l'évaluation de la durabilité des rotations du futur.

Remerciements

Ce travail a bénéficié d'un soutien financier du Groupement d'Intérêt Scientifique Grandes Cultures (2012-2015) et de l'Office Français OFB - projet Ecophyto E-Disc (2021-2024). L'expertise de Frédéric Zahm (INRAE, ETTIS) pour la classification des indicateurs économiques a été fortement appréciée.

Annexe 1 : liste des critères environnementaux

Cause / Effet	Place dans la chaîne de causalité	CRITERES	Code critères
CAUSE	Milieu (caractéristiques et potentialités du site)	Données climatiques	ENV01
		Etat et fonctionnement	ENV02
		Disponibilités des ressources	ENV03
		Etat des terres et du sol	ENV04
	Pratique	Gestion des espaces agricoles	ENV05
		Gestion des espaces non-	ENV06
		Gestion des productions	ENV07
		Gestion des cultures	ENV08
		Gestion et travail du sol	ENV09
		Fertilisation azotée	ENV10
		Fertilisation phosphatée	ENV11
		Autres fertilisations (K, S, Mg, etc.)	ENV12
		Autres fertilisations (amendements organiques)	ENV13
		Pesticides	ENV14
		Elevage	ENV15
		Logement des animaux	ENV16
		Prairies et pâturages	ENV17
		Alimentation des animaux	ENV18
		Produits vétérinaires	ENV19
		Gestion de l'eau	ENV20
		Gestion de l'énergie (et lubrifiants), réduction des GES	ENV21
		Gestion des déchets et coproduits	ENV22
	Etat et fonctionnement du système agricole	Etat et qualité des cultures et	ENV23
		Efficiences	ENV24
		Bilan	ENV25
EFFET	Emission/Consommation-Etat-Impact	Sol	ENV26
		Quantité des eaux	ENV27
		Qualité des eaux souterraines et de surface	ENV28
		Qualité de l'air et changements	ENV29
		Energie	ENV30
		Autres ressources naturelles	ENV31
		Biodiversité	ENV32
		Paysages	ENV33
		Santé et bien-être animal	ENV34
	Propriété	Efficiences	ENV24

Annexe 2 : liste des sous-critères environnementaux (extrait pour les critères de cause)

Cause / Effet	Place dans la chaîne de causalité	CRITERES	Code critères	SOUS-CRITERES	Code sous-critères
CAUSE	Milieu	Données climatiques	ENV01	Température	ENV01_01
				Pluviométrie	ENV01_02
				Rayonnement	ENV01_03
				Evaluation générale ou autre	ENV01_04
		Etat des terres et du sol	ENV04	Géomorphologie	ENV04_01
				Paramètres physico-chimiques / Analyses et observations du sol	ENV04_02
				Vunérabilité, sensibilité aux événements naturels, transfert et aux impacts	ENV04_03
				Potentiel infectieux	ENV04_04
				Evaluation générale ou autre	ENV04_05
		Pratique	Gestion des cultures	ENV08	Adaptation aux conditions locales (cultures adaptées au climat, etc.)
	Rotation				ENV08_02
	Couverture du sol				ENV08_03
	Couverture hivernale du sol				ENV08_04
	Gestion des couverts				ENV08_05
	Semences				ENV08_06
	Gestion et stockage des récoltes				ENV08_07
	Gestion des résidues de récolte				ENV08_08
	Evaluation générale ou autre				ENV08_09
	Gestion et travail du sol		ENV09	Surface avec travail du sol	ENV09_01
				Intensité de travail du sol	ENV09_02
				Lutte anti-érosive	ENV09_03
				Pratiques d'analyses de sol et observations de terrain	ENV09_04
				Evaluation générale ou autre	ENV09_05
	Fertilisation azotée		ENV10	Gestion des intrants à la ferme (stockage, recyclage, etc.)	ENV10_01
				Surfaces fertilisées en azote	ENV10_02
				Bonnes pratiques agricoles (application, raisonnement fertilisation)	ENV10_03
				Quantités d'azote appliquées	ENV10_04
				Ecart aux besoins des cultures / aux conseils	ENV10_05
	Pesticides		ENV14	Gestion des intrants à la ferme (stockage, recyclage, etc.)	ENV14_01
				Surfaces traitées	ENV14_02
				Bonnes pratiques agricoles (application, raisonnement de l'utilisation)	ENV14_03
				Quantités de substances actives	ENV14_04
				Nombre de traitements	ENV14_05
				Intensité d'utilisation (fréquence de traitement)	ENV14_06
				Méthodes alternatives	ENV14_07
				Traitement post récolte	ENV14_08
				Gestion régionale des bioagresseurs	ENV14_09
	Elevage		ENV15	Adaptation aux conditions locales (races adaptées au climat, etc.)	ENV15_01
				Système d'élevage (prairie, hors sol, etc.)	ENV15_02
				Pratiques de reproduction (insémination, etc.)	ENV15_03
				Autres pratiques de gestion d'élevage	ENV15_04

Annexe 3 : liste des sous-critères environnementaux (extrait pour les critères d'effet)

Cause / Effet	Place dans la chaîne de causalité	CRITERES	Code critères	SOUS-CRITERES	Code sous-critères
CAUSE	Etat et fonctionnement du système agricole	Etat et qualité des cultures et pâturages	ENV23	Etat nutritif des cultures	ENV23_01
				Santé des cultures	ENV23_02
				Etat des pâturages	ENV23_03
				Evaluation générale ou autre	ENV23_04
		Bilan	ENV25	Bilan azoté	ENV25_01
				Bilan phosphaté	ENV25_02
				Bilan potassique	ENV25_03
				Bilan d'énergie	ENV25_04
EFFET	Emission/Consommation-Etat-Impact	Sol	ENV26	Utilisation des terres	ENV26_01
				Qualité physique (compaction)	ENV26_02
				Érosion / ruissellement	ENV26_03
				Acidification & pH	ENV26_04
				Salinisation	ENV26_05
				Fertilité chimique du sol (P)	ENV26_06
				Fertilité chimique du sol (K)	ENV26_07
				Fertilité chimique du sol (autres)	ENV26_08
				Fertilité chimique du sol (matière organique)	ENV26_09
				Potentiel d'eutrophisation terrestre	ENV26_10
				Pollution du sol (pesticides, métaux lourds, etc.)	ENV26_11
				Evaluation générale ou autre (fonctionnement, cycle des nutriments, fertilité)	ENV26_12
		Qualité des eaux souterraines et de surface	ENV28	Transferts de NO ₃	ENV28_01
				Transferts PO ₄	ENV28_02
				Transferts et risques liés aux pesticides	ENV28_03
				Autres transferts (métaux lourds, pathogènes)	ENV28_04
				Potentiel d'eutrophisation aquatique	ENV28_05
				Salinisation	ENV28_06
				Modification de la qualité physicochimique des masses d'eau (sédiment, NO ₃ , etc.)	ENV28_07
				Modification de la qualité biologique des masses d'eau (pathogènes, etc.)	ENV28_08
				Evaluation générale ou autre	ENV28_09
		Energie	ENV30	Consommation d'énergie totale / fossile	ENV30_01
				Consommation d'énergie renouvelable	ENV30_02
				Production, bilan, efficience (cultures énergétiques)	ENV30_03
				Production d'énergie renouvelable	ENV30_04
				Energie	ENV30_05
				Evaluation générale ou autre	ENV30_06
		Biodiversité	ENV32	Modification de la qualité des habitats	ENV32_01
				Activité biologique (micro-organismes)	ENV32_02
				Flore	ENV32_03
				Faune	ENV32_04
				Ecotoxicité	ENV32_05
Espèces invasives	ENV32_06				
Services écosystémiques	ENV32_07				
Evaluation générale ou autre	ENV32_08				
Propriété	ENV24	Efficience hydrique	ENV24_01		
		Efficience azotée	ENV24_02		
		Efficience phosphatée	ENV24_03		
		Efficience potassique	ENV24_04		
		Efficience énergétique	ENV24_05		

Annexe 4 : liste des sous-critères sans indicateur

Code sub-criteria	Sub-criteria
ECO08_02	Nature of services
ECO08_08	Quality of services
ENV01_01	Temperature
ENV02_04	ecosystem
ENV03_04	zinc, sulphur, aluminium, etc.)
ENV06_02	Management of other natural areas
ENV12_01	(storage, recycling, etc.)
ENV12_02	Fertilized areas
ENV16_02	Litter management
ENV18_04	Deviation from animal needs/advice
ENV19_02	Number of animal treated
ENV19_04	Amounts of active substances
ENV24_04	Potassium efficiency
ENV29_09	Noises
GOV01_02	Other (traditions)
GOV08_01	Corruption
GOV10_01	Individual liberties
GOV11_01	Trust of actors
GOV11_02	Stakeholder satisfaction
SOC01_02	Neighborhood (distance, type)
SOC04_03	State
SOC05_02	(farmers)
SOC06_01	Marital status of the farmer
SOC09_07	Psycho-social risk management
SOC13_02	Odors
SOC14_01	Animal welfare
SOC17_01	Theft, damage
SOC19_02	Employee-employer

Bibliographie

- Bockstaller, C., & Emonet, E. (2015). RMT Erytage : Evaluer la durabilité des Systèmes et Territoires Agricoles. *Travaux et Innovations*, n°220, ao, 40–41.
- Bockstaller, C., Feschet, P., & Angevin, F. (2015). Issues in evaluating sustainability of farming systems with indicators. *OCL - Oilseeds and Fats*, 22(1). <https://doi.org/10.1051/ocl/2014052>
- Bockstaller, C., Guichard, L., Keichinger, O., Girardin, P., Galan, M. B., & Gaillard, G. (2009). Comparison of methods to assess the sustainability of agricultural systems. A review. *Agronomy for Sustainable Development*, 29, 223–235. <https://doi.org/doi:10.1051/agro:2008058>
- Bockstaller, C., Alaphilippe, A., Angevin, F., (2023). Quels indicateurs pour l'évaluation de la transition agroécologique ? *Agronomie, environnement et sociétés*, Vol.13, N°2. <https://agronomie.asso.fr/aes-13-2>
- Bouthier, A. , Duparque, A., Mary, B., Sagot, S., Trochard, R., Levert, M., Houot, S., Damay, N., Denoroy, P., Dinh, J.-L., Blin, B., & Ganteil, F. (2014). Adaptation et mise en oeuvre du modèle de calcul de bilan humique à long terme AMG dans une large gamme de systèmes de grandes cultures et de polyculture-élevage. *Innovations Agronomiques*, 34, 125–139.
- Buczko, U, & Kuchenbuch, R. O. (2007). Phosphorus indices as risk-assessment tools in the USA and Europe - a review. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science-Zeitschrift Fur Pflanzenernahrung Und Bodenkunde*, 170(4), 445–460. <https://doi.org/10.1002/jpln.200725134>
- Buczko, U, & Kuchenbuch, R. O. (2010). Environmental Indicators to Assess the Risk of Diffuse Nitrogen Losses from Agriculture. *Environmental Management*, 45(5), 1201–1222. <https://doi.org/10.1007/s00267-010-9448-8>
- Buczko, Uwe, & Kuchenbuch, R. O. (2010). Environmental indicators to assess the risk of diffuse nitrogen losses from agriculture. *Environmental Management*, 45(5), 1201–1222. <https://doi.org/10.1007/s00267-010-9448-8>
- Cerf, M., & Meynard, J. M. (2006). Les outils de pilotage des cultures : diversité de leurs usages et enseignements pour leur conception. *Natures Sciences Sociétés*, 14, 19–29.
- Chopin, P., Doré, T., Guindé, L., & Blazy, J. M. (2015). MOSAICA: A multi-scale bioeconomic model for the design and ex ante assessment of cropping system mosaics. *Agricultural Systems*, 140, 26–39. <https://doi.org/10.1016/J.AGSY.2015.08.006>
- CORPEN. (2006). *Des indicateurs AZOTE pour gérer des actions de maîtrise des pollutions à l'échelle de la parcelle, de l'exploitation et du territoire*. Ministère de l'Ecologie et du Développement Durable, http://www.ecologie.gouv.fr/IMG/pdf/maquette_azote29_09.pdf.
- Dardonville, M., Catarino, R., & Therond, O. (2023). Sustainability and resilience against climate change provided by a territorial crop-livestock system. *Journal of Cleaner Production*, 432, 139646. <https://doi.org/10.1016/J.JCLEPRO.2023.139646>
- Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO). (2013). *Sustainability assessment in food and agriculture systems (SAFA) guidelines. Test version 2.0*. Natural Resources Management and Environment Department, FAO [online] URL: http://www.fao.org/fileadmin/templates/nr/sustainability_pathways/docs/SAFA_Guidelines_12_June_2012_final_v2.pdf.
- Guinet, M., Adeux, G., Cordeau, S., Courson, E., Nandillon, R., Zhang, Y., & Munier-Jolain, N. (2023). Fostering temporal crop diversification to reduce pesticide use. *Nature Communications* 2023 14:1, 14(1), 1–11. <https://doi.org/10.1038/s41467-023-43234-x>
- Hufschmitt, E. (2021). *Mise à jour de la base INDIC Amélioration et amendement de la base d'indicateurs INDIC dans le cadre du projet E-DISC*. Université Haute-Alsace, mémoire master.

- Janker, J., & Mann, S. (2020). Understanding the social dimension of sustainability in agriculture: a critical review of sustainability assessment tools. *Environment, Development and Sustainability*, 22(3), 1671–1691. <https://doi.org/10.1007/S10668-018-0282-0/FIGURES/5>
- Keichinger, O., Benoit, P., Boivin, A., Bourrain, X., Briand, O., Chabert, A., Domange, N., Dubus, I. G., Gouy, V., Guichard, L., Pitrel, M., Pleyber, E., Roulier, S., Zahm, F., & Bockstaller, C. (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.
- Langeveld, J. W. A., Verhagen, A., Neeteson, J. J., van Keulen, H., Conijn, J. G., Schils, R. L. M., & Oenema, J. (2007). Evaluating farm performance using agri-environmental indicators: recent experiences for nitrogen management in The Netherlands. *Journal of Environmental Management*, 82(3), 363–376. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2005.11.021>
- Latruffe, L., Diazabakana, A., Bockstaller, C., Desjeux, Y., Finn, J., Kelly, E., Ryan, M., & Uthes, S. (2016). Measurement of sustainability in agriculture: a review of indicators. *Studies in Agricultural Economics*, 118, 123–130. <https://doi.org/10.7896/j.1624>
- López-Ridaura, S., van Keulen, H., van Ittersum, M. K., & Leffelaar, P. A. (2005). Multi-scale methodological framework to derive criteria and indicators for sustainability evaluation of peasant natural resource management systems. *Environment Development and Sustainability*, 7, 51–69.
- Makowski, D., Tichit, M., Guichard, L., Van Keulen, H., & Beaudoin, N. (2009). Measuring the accuracy of agro-environmental indicators. *Journal of Environmental Management*, 90, 139–146. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2008.11.023>
- 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*. Institutut de l'Elevage (IDELE), Paris (France).
- Paracchini, M. L., Bulgheroni, C., Borreani, G., Tabacco, E., Banterle, A., Bertoni, D., Rossi, G., Parolo, G., Origgi, R., & De Paola, C. (2015). A diagnostic system to assess sustainability at a farm level: The SOSTARE model. *Agricultural Systems*, 133, 35–53. <https://doi.org/10.1016/J.AGSY.2014.10.004>
- Parnaudeau, V., Reau, R., & Dubrulle, P. (2012). Un outil d'évaluation des fuites d'azote vers l'environnement à l'échelle du système de culture: le logiciel Syst'N . *Innovations Agronomiques*, 21, 59–70.
- Pellerin, S., Bamière, L., Angers, D., Béline, F., Benoît, M., Butault, J. P., Chenu, C., Colnenne-David, C., De Cara, S., Delame, N., Doreau, M., Dupraz, P., Faverdin, P., Garcia-Launay, F., Hassouna, M., Hénault, C., Jeuffroy, M. H., Klumpp, K., Metay, A., ... Pardon, L. (2013). *Quelle contribution de l'agriculture française à la réduction des émissions de gaz à effet de serre ? Potentiel d'atténuation et coût de dix actions techniques*.
- Rosnoblet, J., Girardin, P., Weinzaepflen, E., & Bockstaller, C. (2006). Analysis of 15 years of agriculture sustainability evaluation methods. In M. Fotyma & B. Kaminska (Eds.), *9th ESA Congress: Vol. Bibliothec* (pp. 707–708).
- Sirami, C., Gross, N., Baillod, A. B., Bertrand, C., Carrié, R., Hass, A., Henckel, L., Miguet, P., Vuillot, C., Alignier, A., Girard, J., Batáry, P., Clough, Y., Violle, C., Giralt, 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., Charbonnier, R., Schlosser, L., Michonneau, P., Michel, N., & Bockstaller, C. (2023). A new

method to assess sustainability of agricultural systems by integrating ecosystem services and environmental impacts. *Journal of Cleaner Production*, 415, 137784. <https://doi.org/10.1016/J.JCLEPRO.2023.137784>

Soulé, E., Hawes, C., Young, M., Henckel, L., Michel, N., Michonneau, P., & Bockstaller, C. (2023). A predictive indicator assessing effect of cropping system and surrounding landscape on biodiversity. *Ecological Indicators*, 151, 110289. <https://doi.org/10.1016/J.ECOLIND.2023.110289>

Soulé, E., Michonneau, P., Michel, N., & Bockstaller, C. (2021). Environmental sustainability assessment in agricultural systems: A conceptual and methodological review. *Journal of Cleaner Production*, 325, 129291. <https://doi.org/10.1016/J.JCLEPRO.2021.129291>

Stone, R.P., Hilborne, D., (2000). Equation universelle des pertes de terre (USLE). Fiche technique. Ministère de l'agriculture, de l'alimentation et des affaires rurales de l'Ontario. <https://www.giser.be/wp-content/uploads/2012/05/USLE-infosCanada.pdf>

Surleau-Chambenoit, C., Morin, A., Galan, M.-B., Cariolle, M., Leclercq, C., Guichard, L., & Bockstaller C. (2013). PLAGE, un réseau d'acteurs et une plate-forme WEB dédiée à l'évaluation agri-environnementale et de la durabilité des pratiques agricoles, des exploitations agricoles et des territoire. *Innovations Agronomiques*, 31, 15–26.

Therond, O., Duru, M., Roger-Estrade, J., & Richard, G. (2017). A new analytical framework of farming system and agriculture model diversities. A review. *Agronomy for Sustainable Development*, 37(3), 24. <https://doi.org/10.1007/s13593-017-0429-7>

Thomas-Delille, E. (2015). *Méthodes d'évaluation et indicateurs du développement durable en agriculture : Elaboration et analyse de la base de données INDIC*. Université Haute-Alsace, mémoire master.

Tixier, P., Malézieux, E., Dorel, M., & Wery, J. (2008). SIMBA, a model for designing sustainable banana-based cropping systems. *Agricultural Systems*, 97(3), 139–150. <https://doi.org/10.1016/J.AGSY.2008.02.003>

Tromp, E. (2023). *Première analyse de la base d'indicateurs de durabilité INDIC® en vue de créer une aide au choix*. AgroParisTech et Université de Lorraine, Master AETPF Nancy M1.

van der Werf, H. G. M., & Petit, J. (2002). Évaluation de l'impact environnemental de l'agriculture au niveau de la ferme : comparaison et analyse de 12 méthodes basées sur des indicateurs. *Courrier de l'environnement de l'INRA*, n°46, 121–133.

Wilson, R. H., Charry, A. A., & Kemp, D. R. (2005). Performance indicators and benchmarking in Australian agriculture: synthesis and perspectives of AccountingP 1. *Extension Farming Systems*, 1(1). <https://doi.org/10.3316/INFORMIT.425376231269179>

Zahm, F., Alonso Ugaglia, A., Boureau, H., Del'homme, B., Barbier, J. M., Gasselin, P., Gafsi, M., Guichard, L., Loyce, C., Manneville, V., Menet, A., & Redlingshofer, B. (2015). Agriculture et exploitation agricole durables : état de l'art et proposition de définitions revisitées à l'aune des valeurs, des propriétés et des frontières de la durabilité en agriculture. *Innovations Agronomiques*, 46, 105–125.

Zahm, Frédéric, Alonso Ugaglia, A., Barbier, J.-M., Boureau, H., Del'homme, B., Gafsi, M., Gasselin, P., Girard, S., Guichard, L., Loyce, C., Manneville, V., Menet, A., & Redlingshöfer, B. (2019). Évaluer la durabilité des exploitations agricoles. La méthode IDEA v4, un cadre conceptuel combinant dimensions et propriétés de la durabilité. *Cahiers Agricultures*, 28, 5. <https://doi.org/10.1051/cagri/2019004>

