



HAL
open science

De nouveaux indicateurs innovants pour répondre à l'évolution des cahiers des charges sur les performances environnementales des exploitations agricoles

Emma Soulé, Christian Bockstaller, Philippe Michonneau, Nadia Michel

► To cite this version:

Emma Soulé, Christian Bockstaller, Philippe Michonneau, Nadia Michel. De nouveaux indicateurs innovants pour répondre à l'évolution des cahiers des charges sur les performances environnementales des exploitations agricoles. *Agronomie, Environnement & Sociétés*, 2023, 13 (2), pp.1-19. 10.54800/esa548 . hal-04470993

HAL Id: hal-04470993

<https://hal.science/hal-04470993>

Submitted on 21 Feb 2024

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.



Distributed under a Creative Commons Attribution 4.0 International License

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 !



TÉMOIGNAGE

De nouveaux indicateurs innovants pour répondre à l'évolution des cahiers des charges sur les performances environnementales des exploitations agricoles

Emma Soulé*, Philippe Michonneau**, Nadia Michel*** et Christian Bockstaller*

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

** SCARA, 10700 Arcis sur Aube, France

*** Université de Lorraine, INRAE, LAE 54500 Nancy, France

Email contact auteurs : christian.bockstaller@inrae.fr

Résumé

Le consommateur est de plus en plus exigeant sur la qualité et le mode de production des produits alimentaires. Les filières agroalimentaires ont ainsi dû adapter leurs cahiers des charges pour répondre aux nouvelles attentes du consommateur. C'est le cas de la SCARA (Société Coopérative Agricole de la Région d'Arcis sur Aube) qui s'est investie depuis de nombreuses années sur le plan environnemental et dans l'évaluation environnementale des produits agricoles. Ceci s'explique par sa stratégie qui est fondée sur le marché de filières spécifiques telles que l'alimentation infantile ou la meunerie. Cependant, pour répondre à la demande sociétale, la SCARA devait aller plus loin dans les indicateurs utilisés, principalement issus de la méthode SYSTERRE®. C'est dans ce contexte que la SCARA a lancé une thèse Cifre en 2019 avec le Laboratoire Agronomie et Environnement d'INRAE Colmar afin de développer des nouveaux indicateurs d'impacts environnementaux et de services écosystémiques. Ces indicateurs se distinguent par les thématiques évaluées et par leur aspect prédictif. Un cadre analytique évaluant conjointement les indicateurs d'impact et de service écosystémique a été proposé et une évaluation de la durabilité globale a été menée sur 33 exploitations adhérentes de la coopérative. Enfin, des fiches de synthèse restituant les principaux résultats ont été réalisées pour chaque exploitation de l'échantillon. La SCARA va s'appuyer sur ces travaux pour discuter des pistes d'amélioration possible en termes de pratiques agricoles avec ses adhérents et pour adapter et co-construire de nouveaux cahiers des charges afin de répondre aux nouvelles demandes du consommateur.

Mots clés : indicateur, impact environnemental, service écosystémique, évaluation multicritère, durabilité, agriculture

Introduction

Le contexte agricole actuel influence fortement les pratiques culturales. En effet, la demande sociétale incite les agriculteurs à utiliser moins d'intrants (produits phytosanitaires et engrais), pour limiter les impacts environnementaux, tout en assurant des productions en quantité et en qualité. De fait, l'agriculture est à l'origine de plusieurs impacts environnementaux tels que la pollution de l'eau et de l'air, l'érosion des sols ou encore la perte en biodiversité. Aux impacts sur les écosystèmes s'ajoutent des impacts sur la santé humaine que ce soient via l'utilisation de produits phytosanitaires classés CMR de catégorie 1A i.e. Cancérogène, Mutagène et Reprotoxique pour l'Homme, ou encore via les émissions ammoniacales qui sont des sources de précurseurs de

particules fines, nocives pour les poumons. Ainsi l'agriculture doit contribuer, en plus d'assurer l'alimentation des populations, à favoriser un contexte qui permette l'expression des services écosystémiques qui participeront à la réduction des intrants et sans diminuer la production. Ceci permettra de préserver la biodiversité (diversification des rotations, aménagement paysager, amélioration de la vie du sol), protéger les sols (réduire l'érosion, limiter leur pollution), respecter les ressources naturelles (pétrole, P, K), limiter le réchauffement climatique (baisse des émissions de gaz à effet de serre) et préserver la ressource en eau et la qualité de l'air. Le monde agricole est donc amené à mettre en place de nombreuses innovations agronomiques pour s'adapter à ce contexte complexe et répondre à ce double défi qui consiste à nourrir une population en développement tout en préservant un environnement fragile.

La SCARA (Société Coopérative Agricole de la Région d'Arcis sur Aube) est une coopérative agricole spécialisée dans la collecte, le stockage et la commercialisation de céréales et d'oléo protéagineux. Elle regroupe 638 adhérents répartis dans un rayon de 30 kilomètres autour d'Arcis-sur-Aube, au cœur de la Champagne Crayeuse. La coopérative constitue un véritable maillon de la chaîne alimentaire car en se situant entre l'amont et l'aval de la filière, elle entretient d'étroites relations avec ses adhérents et ses clients. La SCARA se charge de valoriser les productions de ses adhérents et de commercialiser la collecte auprès des clients aval au travers de nombreuses filières alimentaires qui via leurs cahiers des charges exigent de mettre en œuvre des pratiques agronomiques respectueuses de l'environnement.

L'objectif de cet article est double. Il présentera dans une première partie les actions de la SCARA en faveur d'une agriculture plus respectueuse de l'environnement et les implications en termes d'évaluation et d'utilisation d'indicateurs. Dans une seconde partie, il se focalisera sur les résultats de la thèse Cifre d'Emma Soulé pour montrer les innovations en termes d'évaluation des systèmes agricoles qui pourront être utilisés par la suite par la SCARA. Un des apports de ce travail a été de combiner l'évaluation des impacts environnementaux et des services écosystémiques.

Historique des travaux de la SCARA sur le plan environnemental

La coopérative s'est inscrite dans une stratégie de développement des filières pour intégrer de l'amont (de l'exploitation) à l'aval (les industries de l'agroalimentaire), les questions de création de richesse et la préservation de l'environnement à l'échelle de son territoire.

Historique des actions (chronologie – frise – règlementation)

La déclaration de Rio en 1992 et la réforme de la Politique Agricole Commune (PAC) en 1993, ont été des éléments déclencheurs importants pour les adhérents de la SCARA, qui décidèrent au travers de son conseil d'administration de mettre en place une démarche stratégique tournée vers le développement des filières de qualité et respectueuses de l'environnement. Depuis les années 2000, la SCARA a eu la volonté de mettre en place une démarche qualité et développement durable sur l'ensemble de la filière avec diverses certifications (ISO 9001, Hazard Analysis Critical Control Points (HACCP), 2BSvs (Biomass Biofuels Sustainability voluntary scheme), Agri Confiance® (AGC) et Agri Confiance Volet vert (AGC VV), Haute Valeur Environnementale (HVE), etc.) (Figure 1). Certaines concernent le maillon de l'exploitation agricole comme le 2BSvs, AGC, AGC VV et HVE.

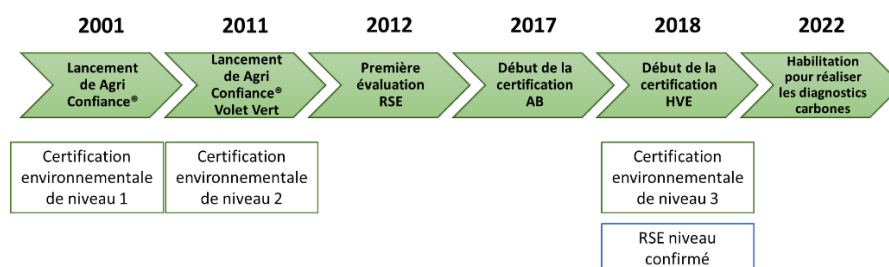


Figure 1 : Démarche environnementale de la SCARA

Afin d'accompagner les agriculteurs, la SCARA choisit en 2001 le référentiel Agri Confiance® (NF Vo1-005) comme démarche qualité globale. Cette dernière est basée sur 16 exigences (Tableau 1), répondant au niveau 1 de la certification environnementale des exploitations et respectant les critères environnementaux de la conditionnalité édictée par la Politique Agricole Commune.

Tableau I : Description des 16 exigences permettant d'obtenir la certification Agri Confiance® reconnue de niveau 1 de la certification environnementale des exploitations agricoles. Quatre grandes thématiques sont étudiées : la biodiversité, la stratégie phytosanitaire, la gestion de la fertilisation et de la ressource en eau. (Norme AFNOR NF V 01-005 « Système de management de la qualité de la production agricole »).

Exigences	Description
Exigence 1	Disposer des documents localisant les zones à enjeux environnementaux (en particulier les zones sensibles pour la qualité de l'eau et les zones de l'exploitation incluses dans des sites Natura 2000).
BIODIVERSITÉ	
Exigence 2	Identifier les infrastructures agroécologiques et notamment les dispositifs végétalisés mis en place au titre de la conditionnalité des aides PAC ou dans le cadre de démarches volontaires sur le plan de l'exploitation.
Exigence 3	Optimiser la gestion de ces dispositifs en fonction des enjeux environnementaux et agronomiques identifiés dans l'exploitation, notamment par l'entretien et le choix des espèces. Les emplacements choisis devront permettre de favoriser la continuité et la pérennité des bandes végétalisées.
Exigence 4	Mettre en œuvre, dans les zones de l'exploitation incluses dans les sites Natura 2000, les mesures conservatoires prévues par le document d'objectif (DOCOB) lorsqu'il existe.
STRATÉGIE PHYTOSANITAIRE	
Exigence 5	Disposer de moyens d'aide à la décision permettant de justifier chaque intervention tels que : Réalisation d'observations sur l'état sanitaire des cultures dans des parcelles représentatives de l'exploitation. Les observations débouchant sur une intervention devront être enregistrées en précisant la cible visée et le facteur déclenchant.
Exigence 6	Adhérer à des démarches collectives de protection des plantes lorsqu'elles existent qu'il s'agisse de lutte ou de mesures préventives.
GESTION DE LA FERTILISATION	
Exigence 7	Stocker les engrais et les effluents d'élevage de manière à éviter toute contamination ou toute fuite dans le milieu naturel.
Exigence 8	Disposer des valeurs fertilisantes des engrais minéraux et organiques, quels qu'ils soient.
Exigence 9	Disposer des estimations sur les quantités d'effluents produites sur l'exploitation.
Exigence 10	Établir, chaque année, un plan prévisionnel de fumure, avec un objectif de rendement réaliste, pour les cultures de plein champ.
Exigence 11	Enregistrer les apports de fertilisants par îlot cultural (date, culture, type de fertilisant, quantités de N et P).
Exigence 12	Comparer le réalisé en termes d'apports et de rendement au plan prévisionnel de fumure. En tenir compte pour l'établissement du plan prévisionnel de fumure suivant, incluant le cas échéant l'implantation d'une culture intermédiaire.
GESTION DE LA RESSOURCE EN EAU	
Exigence 13	Raisonner l'irrigation des cultures en respectant leurs besoins en eau et en faisant participer au maximum la réserve en eau du sol à l'alimentation des cultures.
Exigence 14	Évaluer et noter les volumes d'eau apportés sur chaque îlot irrigué de l'exploitation en indiquant les facteurs de déclenchement de l'irrigation.
Exigence 15	Surveiller le fonctionnement du matériel afin de détecter et pouvoir supprimer rapidement toute fuite d'eau
Exigence 16	Adhérer à des démarches collectives de gestion de la ressource lorsqu'elles existent.

Dans les années 2008 – 2010, les pouvoirs publics mettent en œuvre les premières politiques agricoles résolument tournées vers la préservation de l'environnement avec le Grenelle 1 puis 2. Dans ce contexte, la SCARA adhère au GLOBAL COMPACT (pacte mondial réseau France), porté par les Nations Unies en 2008. Il s'agit d'un cadre d'engagement volontaire par lequel la coopérative s'engage à respecter dix principes permettant de respecter les droits de l'homme, promouvoir les normes internationales du travail, de lutter contre la corruption et de mettre en place des initiatives respectueuses de l'environnement. Les actions conduites chaque année, dans ces quatre domaines, sont explicitées au travers de notre « déclaration sur le progrès ». En plus de l'initiative Global COMPACT, la SCARA met en place, en 2011, dans un esprit d'amélioration continue, la certification Agri Confiance® Volet Vert (Norma AFNOR NF V01-007 « système de management de la qualité et de l'environnement de la production agricole »). C'est en 2012 que la Commission Nationale de la Certification Environnementale (CNCE) a reconnu officiellement la démarche collective Agri Confiance® Volet Vert portée par la SCARA au niveau 2 de la certification environnementale des exploitations. Ainsi, aux 16 exigences de la certification de niveau 1 (Tableau 1) s'ajoute, à l'issue d'un diagnostic, la rédaction d'un plan de progrès adossé à un plan d'action à l'échelle de l'exploitation.

En 2018, pour poursuivre l'accompagnement et favoriser la progression de ses adhérents, la SCARA s'engage dans le développement d'une filière agriculture biologique. Cette dernière compte une vingtaine d'exploitations qui sont accompagnées par une équipe dédiée. De plus, toujours en 2018, la coopérative décide de conduire les exploitations Agri Confiance® Volet Vert vers la certification Haute Valeur Environnementale (HVE). En 2023, 87 exploitations sont certifiées HVE (Figure 2). Elles ont déployé des stratégies permettant de préserver la biodiversité en mettant en place des infrastructures agroécologiques comme les haies, en diversifiant la composition de leurs intercultures, en allongeant leurs rotations (6 ans en moyenne). D'autres initiatives ont été développées pour limiter l'utilisation des intrants. Pour cela des indicateurs ont été suivis comme la balance globale azotée (BGA) en fertilisation ou les indices de fréquence de traitement (IFT) dans le cadre de la protection des plantes. Pour terminer, la gestion de la ressource en eau fait aussi l'objet de suivi en maîtrisant les apports selon le besoin des plantes par la mesure de l'évapotranspiration au travers d'un réseau dense de stations météo connectées. La combinaison des référentiels AGC VV et HVE permet à une exploitation agricole de combiner un grand nombre de thématiques allant des problématiques agronomiques (gestion de l'eau, gestion de la protection des plantes et de la fertilisation) à la gestion des déchets générés sur l'exploitation, à la sécurité et la santé des agriculteurs et de leurs salariés, en passant par la biodiversité à l'échelle de l'exploitation.



Figure 2 : Les trois niveaux de la certification environnementale. 93 % des exploitations de la SCARA sont engagées dans une démarche environnementale dont 87 en HVE. En 2023, 20 % des adhérents livreurs sont engagés en Agri Confiance® ; 54% en Agri Confiance volet Vert et 19% sont Haute Valeur Environnementale.

Enfin en 2022, la SCARA a réalisé sa quatrième évaluation « Label Engagé RSE » (Norme ISO 26000) portant sur la responsabilité sociétale de l'entreprise. Actuellement la coopérative est au troisième niveau dit « confirmé », sur une échelle qui en compte 4. Désormais nous visons le dernier niveau du label (niveau exemplaire).

Démarche en termes d'évaluation environnementale

En s'appuyant sur les deux piliers de sa démarche de développement durable, à savoir le GLOBAL COMPACT et l'évaluation RSE (Responsabilité Sociétale des Entreprises), la SCARA a intégré, dans l'accompagnement de ses adhérents vers une agriculture durable, les exigences portées par Agri Confiance®. Puis dans une démarche de progrès, la coopérative a inclus le référentiel Agri Confiance® Volet Vert correspondant au niveau 2 de la certification environnementale des exploitations. Ce niveau permet aux agriculteurs d'accéder aux filières de production correspondantes et de répondre aux exigences des clients aval. Le niveau le plus élevé HVE offre aux exploitations la possibilité de valoriser leur production dans des filières spécifiques comme celle portée par Agro-Mousquetaire (Figure 3).

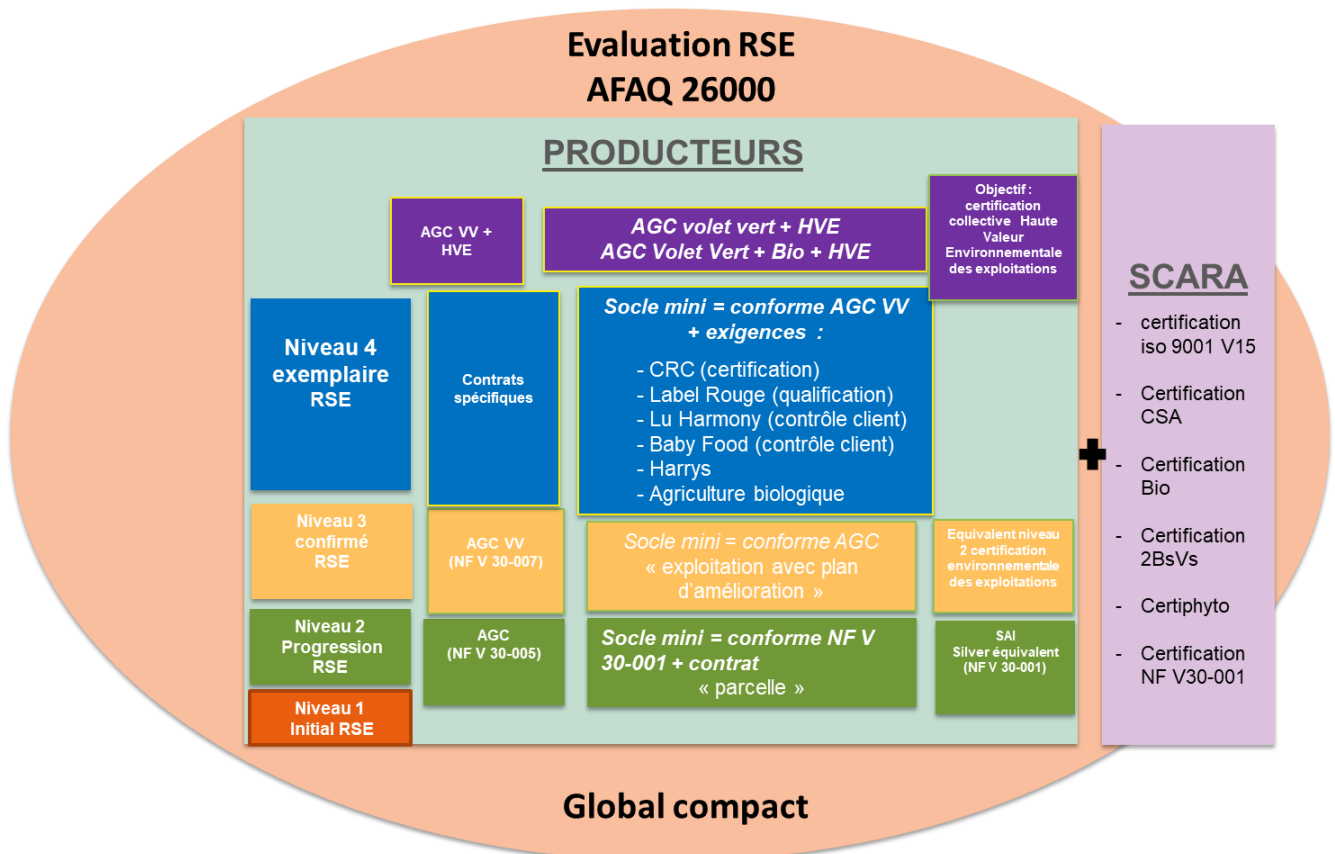


Figure 3 : Intégration des démarches de développement et d'agriculture durable dans la stratégie de déploiement des filières. LA SCARA porte ces propres certifications comme l'ISO 9001 V15 et sa stratégie RSE. La coopérative gère de manière collective les certifications Agri Confiance (AGC), Agri Confiance Volet Vert, Haute Valeur Environnementale (HVE) notamment en réalisant les audits internes auprès de ces adhérents. Enfin La SCARA contrôle que chaque adhérent en filière réalise les cahiers des charges des clients.

L'ensemble des filières, indiquées sur la figure 3, utilise plusieurs indicateurs environnementaux au travers de cahiers des charges de plus en plus complets (Tableau II). Ceux-ci comprennent en premier lieu des exigences concernant la sécurité alimentaire. Ceci se traduit par l'assurance d'une

traçabilité complète du champ aux produits finis. De plus, le blé produit doit garantir la qualité des farines en termes de teneur en protéine et de propriétés rhéologiques. Pour répondre aux demandes des clients, le premier levier est le choix des variétés, qui impacte sur les propriétés technologiques des produits finis. Le choix variétal sur le plan agronomique est aussi essentiel notamment sur les aspects de valorisation de l'azote et de la tolérance aux maladies ou ravageurs. Ce travail de sélection influence donc des indicateurs environnementaux tels que la Balance Globale Azotée (BGA) et l'Indice de Fréquence des Traitements (IFT).

Tableau II : résumé des exigences des filières pour une agriculture durable. L'ensemble des indicateurs environnementaux listés, sont suivis à l'aide de l'outil SYSTERRE®. GES : gaz à effet de serre, IFT : indice de fréquence de traitement, BGA : Balance Globale Azotée.

Thématiques	Objectifs	Actions et indicateurs
Variétés et rotations	Garantir la qualité des farines Réduire la pression phytosanitaire	Allongement des rotations, choix variétaux issus des essais SCARA
Biodiversité	Promouvoir la bioDiversité	Suivi du développement des infrastructures agroécologiques, augmenter le nombre des cultures et des intercultures et le nombre des espèces, analyse de sol (microbiologie), test activité vers de terre, bactérie et champignon, etc.
Agroforesterie	Restaurer les paysages Augmenter la biodiversité Stocker du carbone	Faire des diagnostics, former les agriculteurs, mettre en place des programmes de plantation
Fertilisation	Éviter la surfertilisation Optimiser l'efficacité de l'azote Limiter les GES	Suivre la BGA et les GES Choisir les formes d'azote Piloter les apports
Protection phytosanitaire	Réduire la pression phytosanitaire Réduire le risque de contamination	Calcul des IFT Stocker sans insecticide Pas de glyphosate
Traçabilité	Assurer la sécurité alimentaire	Traçabilité du champ au produit fini

De manière générale, les exigences portent sur le respect et le développement de la biodiversité, en insistant sur l'allongement de la rotation donc l'augmentation du nombre de cultures et la baisse de la part de la culture principale de l'exploitation. En moyenne, la rotation d'une exploitation suivie par la SCARA s'étale sur 6 ans. Une rotation type de Champagne Crayeuse comprend des cultures d'hiver comme du colza, du blé tendre et des escourgeons ainsi que de nombreuses cultures de printemps comme l'orge, la betterave sucrière, la luzerne, la pomme de terre, le chanvre, l'œillette, le pois et le tournesol. L'alternance des cultures d'hiver et de printemps assure une meilleure maîtrise des adventices et de la pression des maladies. La part de la culture principale est comprise entre 20 et 30% de la surface agricole utile. Pour les exploitations certifiées HVE (Version 4), l'objectif est de tendre vers 20%. De plus, l'implantation d'intercultures diversifiées, la plantation de haies et la promotion de l'agroforesterie sont aussi abordées par nos clients. L'enrichissement de la biodiversité, au travers de l'implantation de haies, est une pratique développée à la SCARA depuis 2 ans. 14 projets ont été réalisés. L'objectif est d'implanter pour des parcelles de 10 ha en moyenne une haie de 800 à 900 mètres, simple ou double rang. Depuis quelques années, le suivi de la biodiversité du sol est aussi traité au travers de l'étude des vers de terre ou de l'activité microbiologique (test du Leva-bag, quantification d'ADN ou dénombrement de la flore fongique, bactérienne et analyse de la fréquence de mycorhization). Il est à noter que ce dernier point est aussi inclus dans le nouveau référentiel HVE.

Concernant la gestion de la stratégie phytosanitaire et de la fertilisation, nos clients souhaitent démontrer que toutes les stratégies agronomiques sont déployées pour assurer une baisse significative des intrants. La réduction d'usage des produits chimiques est suivie au travers d'indicateurs comme la BGA et les IFT (pour chaque famille de produits : herbicide, fongicide, insecticide, régulateurs, ...). À cela s'ajoute l'utilisation d'outils d'aide à la décision (OAD). En fertilisation, les outils tel que la télédétection ou les analyses de sève sont utilisées pour piloter les

interventions selon les besoins des cultures. Dans le cadre de la protection contre les maladies fongiques, des OAD intégrant la tolérance variétale et le pédoclimat déclenchent des alertes permettant d'intervenir efficacement pour limiter le nombre d'interventions.

L'ensemble des suivis nécessaires pour répondre aux nombreuses demandes des cahiers des charges filières nécessitent une traçabilité complète des pratiques agricoles. Ce travail est réalisé au sein des équipes de la coopérative à l'aide de l'outil SMAG-Farmer® (logiciel de traçabilité parcellaire). La collecte des données est la cheville ouvrière indispensable pour développer la stratégie AGC VV, HVE et déployer les filières auprès des agriculteurs, ainsi que le calcul des indicateurs qui en découle.

Mise en œuvre du suivi des indicateurs environnementaux en lien avec la traçabilité

Le suivi de la traçabilité des interventions culturales réalisées sur les parcelles est effectué en impliquant l'ensemble des adhérents et salariés de la coopérative (Figure 4). Les agriculteurs saisissent eux même leurs données sur le logiciel SMAG-Farmer® utilisé par la SCARA ou bien ils transfèrent leurs fichiers informatiques issus d'autres logiciels pour intégrer l'ensemble des itinéraires techniques dans les outils SCARA. Certaines exploitations utilisent pour le suivi de leurs travaux des cahiers de plaine papier. Dans ce cas les données sont saisies par les responsables des silos. Après un transfert des données dans l'outil SYSTERRE®, un travail de vérification, de correction et de validation de la base de données est effectué. L'ensemble de ce travail nous permet de calculer des indicateurs de pression comme les IFT, la quantité de matière active, la BGA, les émissions de gaz à effet de serre (EGES), la production d'énergie, ... Des indicateurs économiques peuvent être aussi produits comme le chiffre d'affaires ou la marge brute.

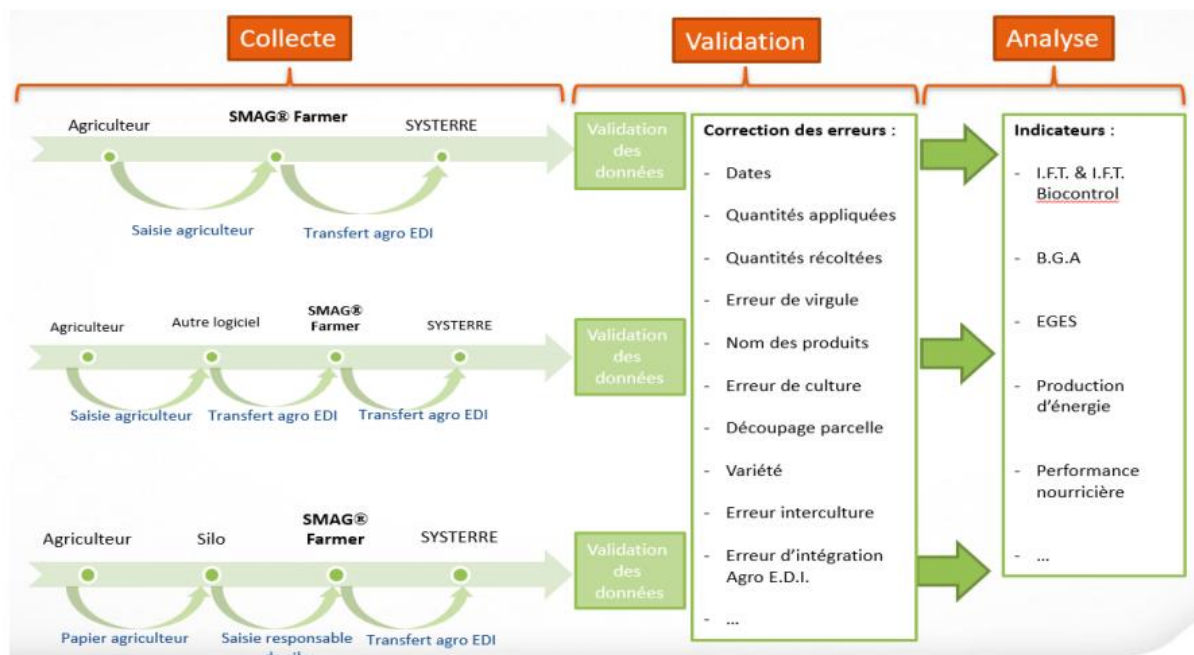


Figure 4 : Méthodes de collecte, validation et analyse des données issues des fiches parcellaires. EGES : émissions de gaz à effet de serre, IFT : indice de fréquence de traitement, BGA : Balance Globale Azotée.

Parmi tous les indicateurs environnementaux énoncés ci-dessus, nous ne pouvions pas répondre à de nouvelles demandes qui émergeaient chez nos clients à propos des contaminations du milieu (air, eau et sol) par les matières actives utilisées dans nos itinéraires de culture. En effet, les outils d'analyse dont nous disposons nous assurent un suivi des IFT, des quantités de matières actives, etc., mais ces indicateurs ne nous informent pas sur leur écotoxicité et leur comportement dans les différents milieux. Par conséquent, il nous a semblé important d'utiliser des méthodes et des outils

d'évaluation des impacts environnementaux sur les eaux (surfiques et souterraines, l'air, le sol et la biodiversité) et ainsi de pouvoir compléter le champ d'évaluation de la durabilité globale des exploitations agricoles. Pour cela une collaboration de la SCARA avec l'Unité Mixte de Recherche LAE d'INRAE Colmar et l'Université de Lorraine a été construite dans le cadre d'une thèse Cifre réalisée (2019-2022) et soutenue le 25 octobre 2022 par Emma Soulé. Ce travail de thèse a permis le développement d'une approche nouvelle et innovante en associant aux impacts environnementaux, l'évaluation des services écosystémiques. Par cette double approche, il est désormais possible d'étudier la durabilité des exploitations, de définir des leviers efficaces pour améliorer cette durabilité et d'envisager le cas échéant des paiements pour services environnementaux (PSE), comme la vente de crédits carbone dans le cadre du Label Bas-Carbone Grandes cultures.

Une nouvelle démarche d'évaluation basée sur un travail de thèse

La nouvelle démarche d'évaluation a été testée sur 33 exploitations adhérentes à la SCARA. Ces exploitations ont été choisies en fonction de leurs assolements, de leurs pratiques agricoles, de leurs cahiers des charges (Harry's, Baby Food, Lu'Harmony, etc.) et de leurs certifications (AB, HVE). Au total, nous avons quatre exploitations déjà en agriculture biologique ou en conversion, 20 exploitations certifiées HVE, 4 exploitations en polyculture élevage et 5 exploitations épandent du digestat de méthaniseur liquide et/ou solide.

De nouveaux indicateurs d'impacts pour la SCARA

De nombreuses méthodes d'évaluation de la durabilité ont été développées depuis les années 80. Cela s'est suivi par une explosion du nombre d'indicateurs (Riley, 2001). Parmi, ces indicateurs beaucoup sont principalement des indicateurs de cause ou d'état mais on dénombre peu d'indicateurs prédictifs (Soulé et al., 2021). Or ces derniers sont intéressants parce qu'ils permettent de faire le lien entre les causes et les effets. La majorité des indicateurs mobilisés par la SCARA notamment via l'utilisation de la méthode SYSTERRE® (ARVALIS Institut du végétal, 2013) sont des indicateurs de cause. Aussi, un des apports de cette thèse a été de développer de nouveaux indicateurs d'impact prédictifs sur des thématiques peu couvertes telles que la perte en phosphore (Figure 5), ou la biodiversité. Ainsi, 3 indicateurs ont été développés : i) l'indicateur MERO_v2 sur la maîtrise de l'érosion ; ii) l'indicateur Phosphore sur la perte de phosphore au niveau de la parcelle et iii) l'indicateur I-BIO qui évalue l'impact des pratiques agricoles et des structures paysagères sur la biodiversité globale à l'échelle de la parcelle. Ces indicateurs sont décrits dans l'annexe 1. D'autres indicateurs prédictifs issus de la méthode INDIGO (Bockstaller et Girardin, 2010) tels que les indicateurs I-Phy et I-N, qui évaluent respectivement les risques de contamination des produits phytosanitaires et les pertes azotées au niveau de la parcelle, ont également été mobilisés.

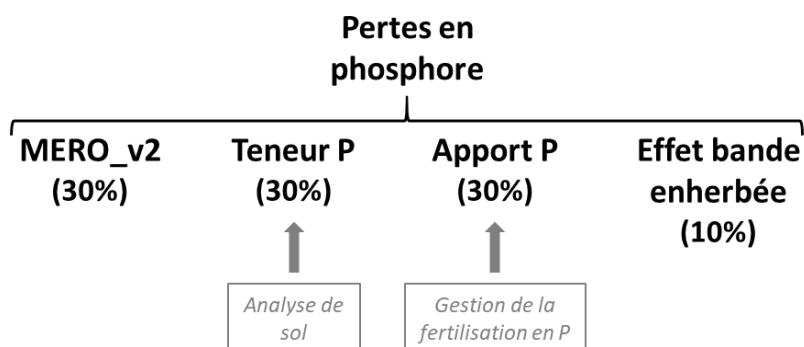


Figure 5 : Schéma résumant la construction de l'indicateur Pertes en phosphore. MERO_v2 est la nouvelle version de l'indicateur de la Maîtrise de l'érosion du sol développé dans la méthode MASC 2.0 (Multi Attribute tool for the assessment of the Sustainability of Cropping systems) (Craheix et al., 2012). Les pourcentages correspondent à la pondération attribuée à chaque variable.

Ces indicateurs d'impact prédictifs viennent enrichir la liste des indicateurs utilisés par la coopérative et seront intéressants pour la construction de cahiers des charges basés sur les résultats.

Impacts et services

La revue bibliographique effectuée au début de la thèse sur les méthodes d'évaluation de la durabilité en milieu agricole, a mis en évidence que ces dernières intégraient très peu d'indicateurs de service écosystémique. Or, il est nécessaire d'évaluer conjointement les impacts environnementaux et les services écosystémiques parce que ces derniers permettent des réductions d'intrants et sont des facteurs d'atténuation des impacts environnementaux et des éléments clés des avantages des écosystèmes agricoles (Therond et al., 2017). En effet, les services écosystémiques (SE) sont définis comme les processus biophysiques de l'écosystème dont l'Homme va tirer des avantages. Aussi, si l'Homme en question est un agriculteur, ce dernier en modifiant ses pratiques agricoles peut favoriser et stimuler les services écosystémiques afin d'en retirer un avantage. La classification internationale commune des services écosystémiques (CICES) distingue 3 types de services écosystémiques : les services d'approvisionnement, les services de régulations et les services culturels (version 5.1, Haines-Young and Potschin, 2018). Le premier type correspond à tous les services d'approvisionnement que ce soient des nutriments, d'eau, de matériaux et d'énergie. Les services de régulation rassemblent l'ensemble des processus écologiques qui contribuent à réguler, dans un sens favorable à l'agriculteur, des phénomènes comme l'occurrence et l'ampleur des maladies, différents aspects du cycle de l'eau (ex. crues, qualité physico-chimique) ou le climat, et le transport des matières (ex. érosion). Enfin, les services culturels sont les services dont la société retire des avantages non matériels, esthétiques, récréatifs et spirituels.

Les pratiques agricoles en modifiant l'écosystème agricole vont changer les processus biophysiques et peuvent par conséquent influencer sur les services écosystémiques et les impacts associés. L'évaluation des services est donc indispensable pour valoriser les bonnes pratiques agricoles des agriculteurs.

Nous nous sommes inspirés du cadre conceptuel de l'étude EFESE (Évaluation Française des Services Ecosystémiques) présenté dans la figure 6 (Tibi et Therond, 2017) pour positionner les services écosystémiques par rapport aux impacts environnementaux (essentiellement négatifs dans notre étude). Dans ce cadre conceptuel, les avantages sont la résultante de combinaisons entre les services écosystémiques (processus écologiques) et les intrants anthropiques (énergie via le travail du sol, chimique via l'utilisation d'engrais et de pesticides, etc.) via des processus technologiques qui dépendent des conditions du milieu. Si on prend l'exemple des pertes en nitrate, cet impact dépend à la fois d'un indicateur de SE : la régulation de la qualité de l'eau (NO₃), de la sensibilité du milieu et des pratiques de fertilisation et de gestion des intercultures (processus technologiques).

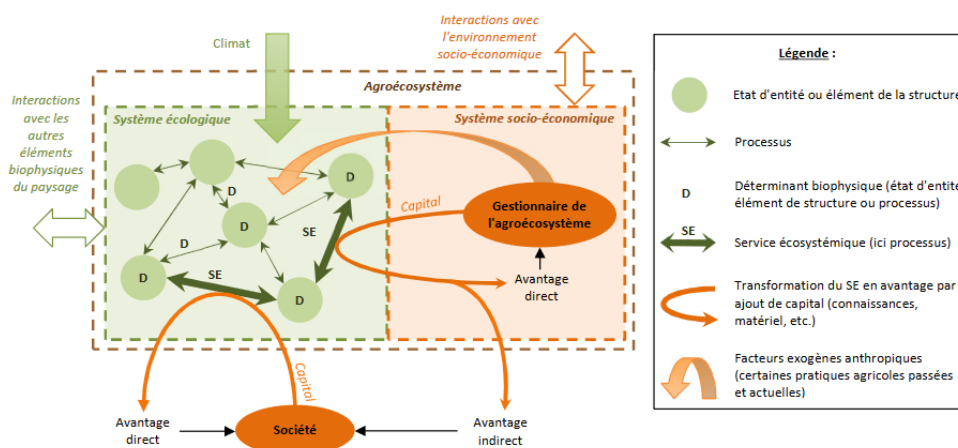


Figure 6: Représentation du cadre conceptuel de l'étude EFESE, appliqué à la fourniture de deux services écosystémiques : l'un rendu directement à la société, l'autre rendu directement au gestionnaire de l'agroécosystème et dont la société dérive un avantage indirect (issu de Tibi et Therond 2017).

Les indicateurs de services écosystémiques retenus dans notre méthode ont été calculés à l'aide de divers outils. Le stockage de carbone a été calculé à l'aide du modèle AMG (Clivot et al., 2019). Ce modèle permet de simuler les variations de stockage/déstockage de carbone à la parcelle, sur un pas de temps donné. Pour notre étude, nous avons réalisé des simulations sur 30 ans. 12 services écosystémiques associés aux successions culturales ont été calculés avec l'indicateur I-DRo (Keichinger et al., 2021). Cet indicateur attribue une note aux services écosystémiques en fonction de la succession culturale réalisée. Enfin, le service écosystémique correspondant à la variation d'albédo au niveau d'une parcelle a été développé sur un calculateur Excel.

Pour aller plus loin qu'une simple liste d'indicateurs respectivement d'impacts et de services écosystémiques, nous avons proposé un cadre d'analyse décrit dans l'encadré 1. Une analyse conjointe par couple d'impact/service a été développée en plus d'approches plus classiques (corrélation, analyse multivariée, etc.).

Encadré 1 : Une analyse conjointe d'indicateurs d'impact et de service écosystémique

Dans le cadre de notre étude, nous avons souhaité aller plus loin que les approches par corrélation ou analyses multivariées en utilisant les relations décrites dans notre cadre conceptuel. Nous avons ainsi identifié plusieurs couples d'indicateurs Impact Environnemental/Service Ecosystémique (IE/SE) (cf. figure 7). Pour chaque indicateur, nous avons fixé un seuil qui correspond au milieu de la plage des valeurs, obtenues avec notre échantillon de 33 exploitations. Ce seuil relatif est discutable et peut être amélioré en prenant des moyennes régionales ou en définissant un seuil à dire d'experts. Dans tous les cas, il a permis de distinguer quatre situations.

Deux situations fournissent une information évidente (Figure 7) :

- **Situation gagnant-gagnant**, les deux indicateurs IE et SE sont dans l'intervalle favorable (impact faible et service élevé, zone verte sur la figure 7),
- **Situation perdant-perdant** : les deux indicateurs IE et SE sont dans l'intervalle défavorable (impact fort et service faible, zone rouge sur la figure 7).

Les deux autres situations nécessitent plus d'explications :

- **La situation perdant-gagnant** (zone gris foncé figure 7) avec un SE faible (défavorable) et un impact faible (favorable) peut être due à une situation où l'effet négatif de l'impact environnemental n'est pas encore observé. Cela peut s'expliquer par un mécanisme tampon, un délai dans le temps de réponse ou les deux (ex. le stockage du nitrate dans un sol profond ; le contrôle des adventices). Un tel cas peut également être possible par la mise en place d'une pratique réduisant l'impact sans pour autant augmenter le service correspondant (labour perpendiculaire à la pente sans couverture de sol en hiver). Cela aura pour conséquence des impacts pour d'autres thèmes et se traduira par la dégradation d'un ou plusieurs autres indicateurs. Si on prend l'exemple de l'érosion, la pratique de non-travail du sol sans la mise en œuvre des deux autres piliers de l'agriculture de conservation des sols qui fournissent des SE (rotation, couverture du sol, Mondal et al., 2019) entraînera une utilisation plus importante d'herbicides et en particulier de glyphosate (Cordeau, 2022).

- **La situation gagnant-perdant** (zone gris clair sur la figure 7) avec un SE élevé (favorable) et un impact élevé (défavorable) correspond à une situation où le potentiel SE n'est pas réellement utilisé par les agriculteurs (Dardonville et al., 2022). Un exemple peut être la non prise en compte des fournitures d'azote par la minéralisation du sol et l'apport des cultures dans le calcul de la dose d'azote.

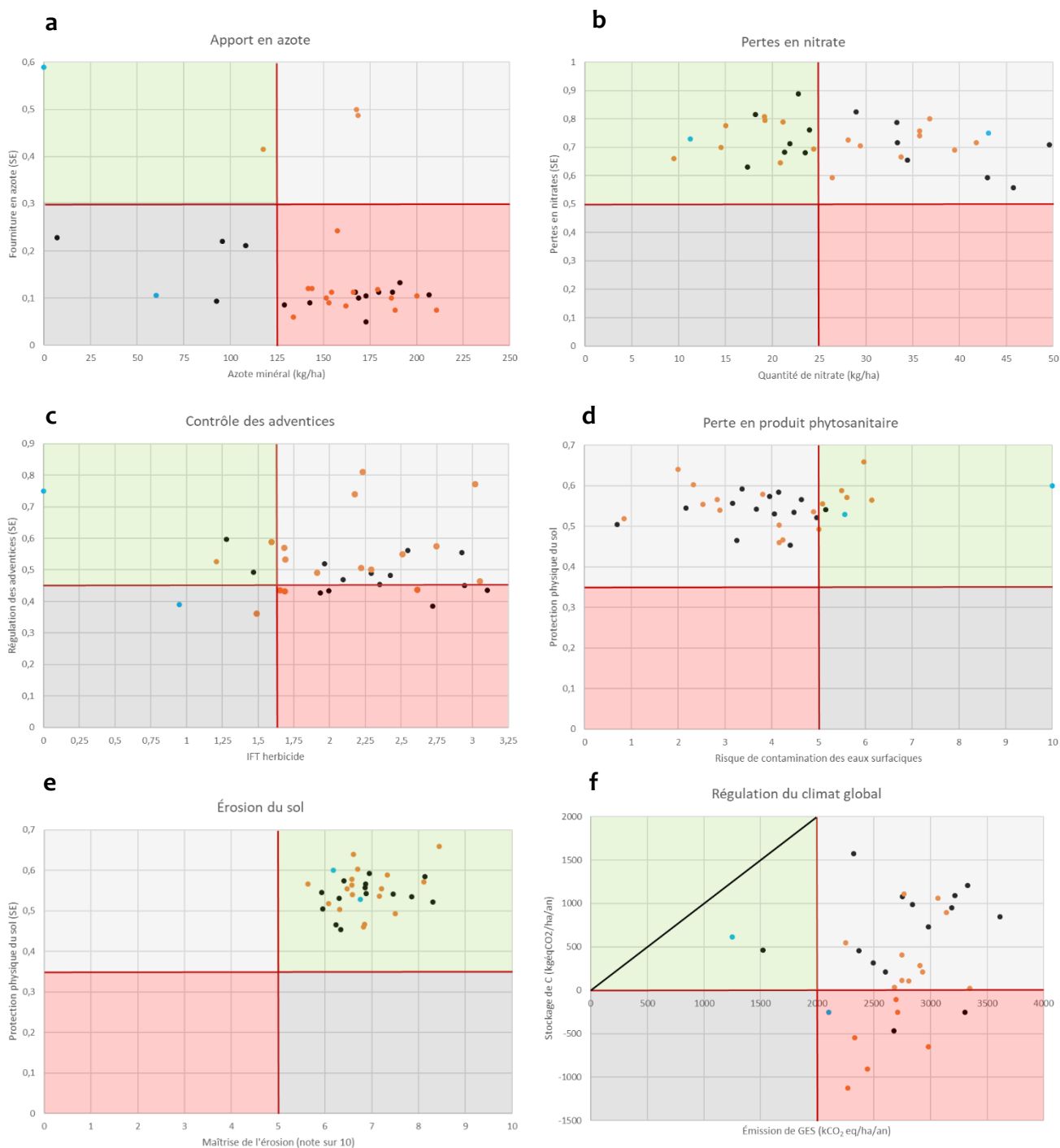


Figure 7 : Évaluation conjointe de 6 principaux thèmes environnementaux : a) Apport en azote ; b) Pertes en nitrate ; c) Contrôle des adventices ; d) Pertes en produit phytosanitaire ; e) Érosion du sol et f) Régulation du climat global. Les points représentent la situation de chaque exploitation pour les 3 groupes d'exploitations agricoles : agriculture conventionnelle (AC) en noir, référentiel HVE en orange et agriculture biologique (AB) en bleu. Les lignes en rouge correspondent au milieu de la gamme de valeurs. Ce milieu est relatif à l'étude de cas. Les différentes zones verte, rouge, gris clair et gris foncé correspondent respectivement à la situation gagnant-gagnant, à la situation perdant-perdant, à la situation gagnant-perdant et à la situation perdant-gagnant (AC : n=14, HVE : n=17, AB : n=2).

Une évaluation de la durabilité

L'évaluation de la durabilité globale des 33 exploitations retenues pour l'étude c'est-à-dire les trois dimensions de la durabilité : environnementale, économique et sociale, a été réalisée en appliquant la méthode du Front de Pareto (Steinke et al., 2019). Cette dernière a été utilisée pour identifier les exploitations qui sont plus performantes que les autres exploitations pour un ou plusieurs indicateurs, sans présenter des valeurs plus faibles pour d'autres indicateurs. Cette méthode

permet donc de discriminer les exploitations entre elles. Pour appliquer la méthode, nous avons sélectionné 10 indicateurs, dont le calcul est présenté dans l'annexe 2, parmi les 27 indicateurs calculés afin de limiter le nombre de dimensions et d'analyser plus facilement les résultats. L'ensemble des indicateurs calculés sont présentés dans l'annexe 3. Nous avons sélectionné des indicateurs non corrélés, traitant des principaux thèmes de la durabilité. L'étape suivante a consisté à définir la direction de changement souhaitée. Dans notre cas, les directions de changement souhaitée pour les 10 indicateurs étaient les suivantes : maximiser les valeurs des indicateurs, en matière de réduction de la contamination par les pesticides des eaux souterraines et de l'air par volatilisation, le bilan carbone, la structure du sol, la qualité du paysage, la production d'énergie et la marge brute ; et minimiser les pertes de nitrate et le temps de travail. La méthode du front Pareto nous a permis d'attribuer un rang à chaque exploitation. Les analyses statistiques ont été réalisées à l'aide de la version RStudio 1.3.959 et le package emoa.

Parmi nos 33 exploitations évaluées pour les 10 indicateurs (Figure 8), seule une exploitation (Farm 02-2H0) a obtenu le rang 1. C'est effectivement l'exploitation qui a de bons résultats pour l'ensemble des indicateurs retenus, ce qui la distingue de toutes les autres. Elle a de très bons résultats pour les indicateurs de services écosystémiques et des résultats corrects pour les indicateurs économiques (energy production et gross margin). La seule exploitation en agriculture biologique (Farm 04-320) a d'excellents résultats pour les indicateurs de performances environnementales mais a des résultats plus faibles pour les performances socioéconomiques (Energy production et Work time) ne lui permettant pas d'être de rang 1.

Des sorties opérationnelles

La thèse étant sous convention Cifre, le volet appliqué des travaux de thèse n'a pas été négligé. Ainsi, les nouveaux indicateurs ont été développés sur des supports standards ou « user-friendly » tels que le fichier Excel ou le logiciel DEXi¹ (Bohanec, 2009). Le logiciel DEXi n'a été utilisé que pour la construction de l'indicateur I-BIO. Les indicateurs calculés durant la thèse n'ont pas été agrégés. L'objectif est que le conseiller de la coopérative puisse facilement calculer les indicateurs nouvellement développés. Nous avons également créé des fiches de synthèse des résultats de l'évaluation de la durabilité pour chaque exploitation de l'échantillon (figure 9). Le but est de restituer à l'agriculteur de manière synthétique les résultats obtenus sur son exploitation et de l'amener à discuter de ces résultats avec son conseiller de la coopérative. Cette fiche est donc un support de discussion pour échanger sur les pistes d'amélioration possibles en fonction des leviers identifiés et des souhaits de l'agriculteur. La fiche est composée en trois grandes parties : 1) Évaluation de la durabilité ; 2) Comparaison des impacts et des services (écosystémiques) ; 3) Détails des impacts pour les risques de pollution par les produits phytosanitaires, par les pertes azotées, l'évolution du stockage de carbone et une synthèse des principaux indicateurs calculés par l'outil SYSTERRE®.

Farm	RCeso	Rcair vol	NO3	C balance	Soil structure	Landscape	Energy production	Gross margin	Work time	Rank
02-2H0	5.8	8.5	-19	-1654	0.67	0.60	142,304	1053	-3.0	1
01-100*	4.4	6.7	-22	-1063	0.65	0.55	156,263	1262	-1.8	2
01-2M0	5.7	5.9	-50	-2768	0.52	0.41	151,244	2142	-2.9	2
01-3M0	4.9	7.6	-17	-2125	0.57	0.49	146,534	447	-4.1	2
01-4HC	5.2	7.5	-34	-3394	0.62	0.52	105,388	738	-2.9	2
02-1H0	5.2	4.5	-9	-2003	0.69	0.57	161,252	714	-3.0	2
02-300*	6.5	6.9	-24	-2392	0.60	0.50	143,804	1447	-4.0	2
02-40B	6.3	7.0	-34	-749	0.59	0.56	134,622	1082	-1.6	2
03-1HB*	5.8	8.1	-15	-2336	0.65	0.49	137,007	1253	-5.2	2
03-20B*	5.3	5.3	-18	-3558	0.60	0.56	169,148	1225	-4.5	2
03-3H0	5.1	7.0	-19	-3344	0.61	0.55	185,912	1225	-3.5	2
03-4H6	5.7	5.9	-15	-2624	0.56	0.49	161,054	592	-3.8	2
04-10B	5.4	4.1	-23	-2238	0.56	0.55	159,430	2356	-5.9	2
04-20B*	5.9	3.8	-21	-1675	0.59	0.55	184,174	890	-3.9	2
04-320	10.0	10.0	-11	-628	0.72	0.52	104,063	1054	-5.7	2
04-406*	4.5	6.1	-33	-2179	0.71	0.56	179,083	1443	-2.7	2
05-130*	6.2	9.2	-36	-2871	0.60	0.51	90,758	17	-3.4	2
05-2H7	5.2	5.9	-39	-2794	0.70	0.56	161,633	949	-2.8	2
05-4V0	4.6	4.7	-23	-2255	0.59	0.58	162,654	752	-3.7	2
06-200	5.3	5.7	-33	-1854	0.70	0.56	135,442	963	-3.4	2
06-4H5	4.4	6.1	-29	-2631	0.53	0.49	155,263	1041	-2.8	2
07-2MY*	5.1	4.5	-43	-3146	0.54	0.45	143,187	2179	-3.3	2
07-4H5	5.1	7.0	-28	-2719	0.62	0.55	147,387	1031	-3.4	2
08-2HY	4.9	7.1	-36	-2696	0.59	0.55	148,213	1003	-4.1	2
08-410	4.8	5.4	-29	-2114	0.66	0.55	148,359	1	-5.2	2
09-2HY	5.5	7.0	-24	-2641	0.57	0.47	178,718	980	-4.5	2
09-4H5	4.0	6.6	-37	-1708	0.66	0.53	143,550	1339	-2.1	2
10-2H7	4.8	6.3	-21	-3634	0.47	0.43	193,938	1412	-3.1	2
10-4HC	4.3	5.7	-42	-2965	0.65	0.56	147,463	1661	-2.9	2
11-220	7.3	9.7	-44	-2555	0.53	0.49	87,105	691	-5.1	2
11-446*	4.7	8.3	-21	-2245	0.59	0.55	111,931	117	-4.4	2
12-2MB	4.1	4.2	-46	-1905	0.54	0.49	112,477	356	-2.5	2
13-210	6.6	6.3	-26	-3323	0.54	0.43	151,620	393	-6.3	2

Figure 8 : Classification des 33 exploitations avec 10 indicateurs suivant la méthode du front de Pareto. Le gradient de couleur thématise la valeur de l'indicateur en fonction de sa position. RCeso et Rcair vol : sous-indicateurs de l'indicateur I-Phy2 calculant respectivement le risque de contamination des eaux souterraines et de l'air via le processus de volatilisation.

Code de l'exploitation : 08-410

Rotation de culture sélectionnée :

Op_Mo/Bs/Op/Co/Bh_Mo/Op_Mo/Bs/Op_Mo/Ppp_Mo/Bh

Campagne 2019/2020

Part de la SAU utilisée :



Évaluation de la durabilité

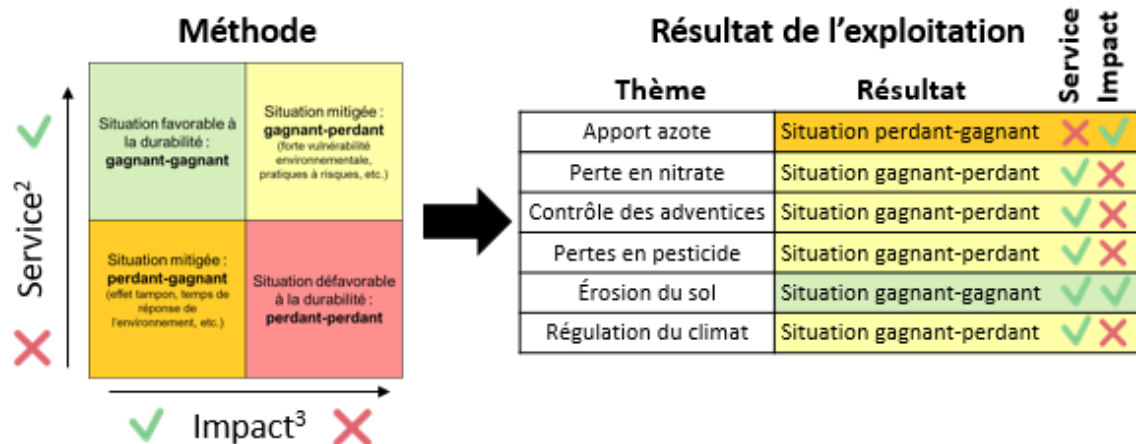
	RCeso	Rcair vol	NO3	Bilan C	Structure sol	Paysage	Production d'énergie	Marge brute	Temps travail
Unités	0-10	0-10	kg N/ha	kg éqCO2/ha	/	/	MJ/ha	€/ha	h/ha
Votre exploitation	4,8	5,4	29	2114	0,66	0,55	148359	1	5,2
Référence ¹	5,8	8,5	19	1654	0,67	0,60	142304	1053	3,0

Points forts et faibles

- Structure du sol
- Bilan C
- Qualité du paysage

- Marge brute
- Temps de travail
- Contamination par les produits phytosanitaires (eaux souterraines & air)

Impacts et services écosystémiques



¹Référence : exploitation présentant le meilleur compromis entre les performances environnementales et socioéconomiques

²Services écosystémiques

- Apport d'azote : via l'intégration de légumineuses
- Perte en nitrate : gestion la succession et des cultures piège à nitrate
- Contrôle des adventives : gestion des adventives via l'alternance date de semis et étouffement par le couvert végétal
- Pertes en pesticide : limite des pertes en pesticides grâce au couvert végétal
- Érosion du sol : gestion des résidus de culture et effet couvert végétal
- Régulation du climat : stockage de C dans le sol et atténuation via le phénomène d'albédo (rayonnement solaire réfléchi par la surface)

³Impacts : impacts environnementaux liés aux apports azotés, à l'érosion, etc.

I-PHY Indigo Traitement à risque

4 cultures les plus à risque

Culture	Substance active n°1	Substance active n°2	Note par culture (0-10)
Betterave sucrière	Soufre	Glyphosate	0,0
Pois protéagineux	Chlorothalonil	Glyphosate	4,0
Orge de printemps	2,4-MCPA	Tébuconazole	4,0
Blé tendre d'hiver	Soufre	Flufénacet	4,1

Eaux souterraines

Eaux superficielles

Air

Meilleure note = 10

IN Indigo Perte d'azote (en kg N/ha)

Culture	N03	NH3	N20
Betterave sucrière	22	49	4,3
Orge de printemps	48	41	5,6
Colza d'hiver	66	21	4,9
Blé tendre d'hiver	10	23	3,5

Organique

Minérale

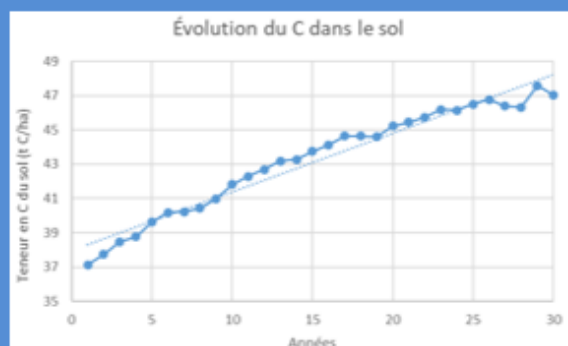
N

Faible

Moyen

Élevé

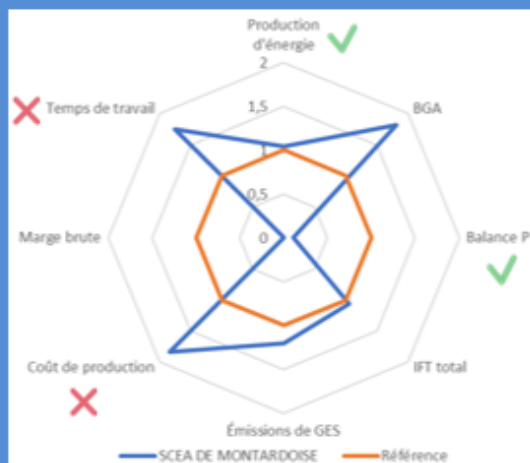
AMG : modèle simulant l'évolution du C



Bilan C

- Émissions de GES : 3329 kg eqCO₂/ha/an
- Stockage de C : -1209 kg eqCO₂/ha/an
- Bilan : +2120 eqCO₂/ha/an émissions

SYSTEMERE



Synthèse

- Structure du sol
- Bilan C plus favorable que la moyenne mais émetteur de GES
- Marge brute
- Risque de contamination par les produits phytosanitaires

Remarque bilan C
RAS

Figure 9 : Exemple de fiche de synthèse résumant les résultats de l'évaluation de la durabilité et de certains indicateurs pour une des exploitations de l'échantillon.

Conclusion et perspectives

La demande sociétale de plus en plus forte conduit les clients de la SCARA à intégrer des exigences toujours plus précises concernant les enjeux environnementaux. Ceci a nécessité la mise en place d'une logistique pour la collecte, la gestion des données en vue du calcul des indicateurs. Dans ce processus, une phase de vérification est essentielle. Les travaux de thèse Cifre d'Emma Soulé ont permis le développement d'indicateurs innovants prédictifs tels que des indicateurs d'impacts environnementaux sur des thématiques rarement traitées (pertes en phosphore, impact sur la biodiversité globale) ou des indicateurs de services écosystémiques. Ces indicateurs ont été positionnés dans un cadre conceptuel afin d'évaluer conjointement les impacts environnementaux et les services écosystémiques ce qui n'avait jamais été proposé jusqu'à présent. De plus, nous avons suggéré un cadre analytique pour évaluer conjointement les impacts et les services en allant plus loin que les approches corrélatives ou multivariées. Ceci a mis en exergue le fait que de nombreuses exploitations agricoles pourraient s'appuyer sur un ou plusieurs services écosystémiques potentiels mais qu'ils ne sont pas utilisés par les agriculteurs pour réduire les impacts environnementaux associés. Or c'est là que le rôle de facteur d'atténuation des services écosystémiques pour les impacts environnementaux prend tout son sens.

La méthode que nous avons développée présente cependant quelques limites. Tout d'abord concernant les indicateurs nouvellement développés, des améliorations seront à apporter avec le développement des connaissances sur ce sujet, notamment pour l'albédo, pour lequel il manque encore des données précises sur l'effet des cultures. Une autre limite réside dans la définition des seuils pour l'évaluation conjointe des impacts environnementaux et des services écosystémiques. De fait, ces seuils ont été définis par rapport à notre échantillon d'exploitations or il est nécessaire d'ajuster ces seuils en fonction de spécificités territoriales (caractéristiques paysagères telles que les densités de haie) ou de réalités scientifiques (abondance et diversité des oiseaux agricoles).

Enfin, d'un point de vue pratique, les outils de calculs pour mettre en œuvre les indicateurs en dehors de la méthode SYSTERRE® n'ont pas été regroupés sous une même interface et ne sont pas connectés entre eux. Ceci peut limiter le nombre de calculs car l'encodage des données dans les différents outils peut être fastidieux.

Une perspective de ces travaux est d'appliquer la méthode au niveau d'un territoire agricole. En effet, l'évaluation des impacts et des services au niveau de la parcelle agricole nous donne une première information mais aurait plus de sens à l'échelle territoriale. De fait, les processus biophysiques ne peuvent être restreints à la parcelle puisque cette dernière s'insère dans un écosystème agricole. De même, les organismes auxiliaires ou les bioagresseurs se déplacent dans cet agroécosystème selon leur rayon de dispersion. Ainsi, l'évaluation de la durabilité à l'échelle territoriale permettrait d'avoir une vue globale des niveaux d'impacts et de services.

La coopérative va s'appuyer sur les travaux effectués dans le cadre de cette thèse, pour répondre aux besoins de ses clients (Tableau II). Ainsi, l'étude de l'impact des pratiques agricoles et les services écosystémiques générés seront évalués (au travers de la fiche ci-dessus Figure 9). Ce travail d'évaluation multicritère, réalisé régulièrement, permettra de suivre la progression de la durabilité des exploitations agricoles. Ceci aidera à faire évoluer les filières vers des productions de plus en plus durables. Dans ce contexte, la coopérative SCARA et ses adhérents, seront alors force de propositions et apporteront des solutions innovantes et efficaces adaptées à leur territoire, pour participer à la co-construction de nouveaux référentiels, répondant mieux aux problématiques environnementales locales. Enfin, de façon plus générale, il est nécessaire de valoriser économiquement les exploitations dont les pratiques et systèmes s'inscrivent dans une démarche globale de durabilité et de transition agroécologique, en finançant tout ou partie des charges liées au changement des pratiques culturales. Ceci pourrait être envisagé dans le cadre des paiements pour services environnementaux. Ces derniers rémunéreront les agriculteurs pour des actions qui contribuent à restaurer ou maintenir les écosystèmes, dont la société tire des avantages comme la préservation de la qualité de l'eau et de l'air, le stockage de carbone et de la biodiversité.

Bibliographie

ARVALIS Institut du végétal, 2013. SYSTERRE - Méthode de calcul d'indicateurs 1–16.

Bockstaller, C., Girardin, P., 2010. Mode de calcul des indicateurs agri-environnementaux de la méthode INDIGO®. Colmar.

Bohanec, M., 2009. DEXi: Program for Multi-Attribute Decision Making User's Manual. Evaluation 13100.

Clivot, H., Mouny, J.C., Duparque, A., Dinh, J.L., Denoroy, P., Houot, S., Vertès, F., Trochard, R., Bouthier, A., Sagot, S., Mary, B., 2019. Modeling soil organic carbon evolution in long-term arable experiments with AMG model. Environ. Model. Softw. 118, 99–113. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2019.04.004>.

Cordeau, S., 2022. Conservation Agriculture and Agroecological Weed Management. Agronomy 12. <https://doi.org/10.3390/agronomy12040867>

Craheix, D., Angevin, F., Bergez, J., Bockstaller, C., Colomb, B., Guichard, L., Reau, R., Doré, T., 2012. MASC 2.0, un outil d'évaluation multicritère pour estimer la contribution des systèmes de culture au développement durable TT - MASC 2.0: a multi attribute tool for the assessment of the sustainability of cropping systems. Innov. Agron. 20, 35–48.

Dardonville, M., Legrand, B., Clivot, H., Bernardin, C., Bockstaller, C., Therond, O., 2022. Assessment of ecosystem services and natural capital dynamics in agroecosystems. Ecosyst. Serv. 54, 101415. <https://doi.org/10.1016/j.ecoser.2022.101415>.

Haines-Young, R., Potschin, M., 2018. Revision of the common international classification for ecosystem services (CICES V5.1): A policy brief. One Ecosyst. 3, 1–6. <https://doi.org/10.3897/oneeco.3.e27108>

Keichinger, O., Viguier, L., Corre-hellou, G., Messean, A., Angevin, F., 2021. Un indicateur évaluant la diversité globale des rotations : de la diversité des cultures aux services écosystémiques. Agron. Environ. sociétés 1775–4240, 1–19.

Mondal, S., Chakraborty, D., Das, T.K., Shrivastava, M., Mishra, A.K., Bandyopadhyay, K.K., Aggarwal, P., Chaudhari, S.K., 2019. Conservation agriculture had a strong impact on the sub-surface soil strength and root growth in wheat after a 7-year transition period. Soil Tillage Res. 195, 104385. <https://doi.org/10.1016/j.still.2019.104385>

Riley, J., 2001. The indicator explosion: Local needs and international challenges. Agric. Ecosyst. Environ. 87, 119–120. [https://doi.org/10.1016/S0167-8809\(01\)00271-7](https://doi.org/10.1016/S0167-8809(01)00271-7)

Soulé, E., Michonneau, P., Michel, N., Bockstaller, C., 2021a. Environmental sustainability assessment in agricultural systems: A conceptual and methodological review. J. Clean. Prod. 325. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.129291>

Steinke, J., Mgimiloko, M.G., Graef, F., Hammond, J., van Wijk, M.T., van Etten, J., 2019. Prioritizing options for multi-objective agricultural development through the Positive Deviance approach. PLoS One 14, 1–20. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0212926>

Therond, O., Tichit, M., Tibi, A., Accatino, F., Biju-Duval, L., Bockstaller, C., Bohan, D., Bonaudo, T., Boval, M., Cahuzac, E., Casellas, E., Chauvel, B., Choler, P., Constantin, J., Cousin, I., Daroussin, J., David, M., Delacote, P., Derocles, S., De Sousa, L., Domingues Santos, J.P., Dross, C., Duru, M., Eugène, M., Fontaine, C., Garcia, B., Geijzendorffer, I., Girardin, A., Graux, A.-I., Jouven, M., Langlois, B., Le Bas, C., Le Bissonnais, Y., Lelièvre, V., Lifran, R., Maigné, E., Martin, G., Martin, R., Martin-Laurent, F., Martinet, V., McLaughlin, O., Meillet, A., Mignolet, C., Mouchet, M., Nozières-Petit, M.-O., Ostermann, O.P., Paracchini, M.L., Pellerin, S., Peyraud, J.-L., Petit-Michaut, S., Picaud, C., Plantureux, S., Poméon, T., Porcher, E., Puech, T., Puillet, L., Rambonilaza, T., Raynal, H., Resmond, R., Ripoche, D., Ruget, F., Rulleau, B., Rush, A., Salles, J.-M., Sauvart, D., Schott, C., Tardieu, L., 2017b. Volet “écosystèmes agricoles” de l'Evaluation Française des Ecosystèmes et des Services Ecosystémiques 966.

Tibi, A., Therond, O., 2017. Evaluation des services écosystémiques rendus par les écosystèmes agricoles. Une contribution au programme EFESE. Synthèse du rapport d'étude.



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.

Annexe 1 : Description des nouveaux indicateurs développés pour la méthode

Indicateur	Méthode originale	Modifications	Variables d'entrée	Unités/Gammes des variables de sortie	Aperçu de la méthode de calcul	Références
Albédo	NC	Nouvel indicateur	Albédo du sol Albédo des cultures	Valeurs comprises entre 0 et 1	Moyenne pondérée des valeurs d'albédo du sol et des cultures	
I-BIO	NC	Nouvel indicateur	Variables de pratiques agricoles (apport en fertilisation, nombre de traitement, travail du sol) et des variables paysagères (taille de la parcelle, pourcentage d'habitats semi-naturels).	3 classes pour les variables d'entrée 4 classes pour les groupes taxonomiques, les pressions anthropiques et les ressources trophiques 5 classes pour la biodiversité globale (I-BIO)	La biodiversité globale est agrégée avec les 4 groupes taxonomiques, avec des pondérations égales. Le groupe des invertébrés est divisé en deux sous-groupes : les invertébrés du sol et les invertébrés volants. Chaque groupe taxonomique et les deux sous-groupes sont agrégés avec les pressions anthropiques et les ressources trophiques, à l'exception de la végétation, qui est agrégée avec l'intensification régionale et aux mauvaises herbes.	Soulé et al. (2023)
MESS (Maîtrise de l'Etat Structural du Sol)	MASC 2.0	Mise en œuvre dans un calculateur Excel	X1: Dégradation de la structure du sol X2: Régénération de la structure du sol	4 classes pour chaque variable	X1 et X2 sont agrégées avec le logiciel DEXi avec une pondération respective de 60% et 40%.	Craheix et al. (2012)
MERO (Maîtrise de l'ERosion)	MASC 2.0 & C factor	Passage d'une évaluation qualitative à une évaluation quantitative via l'utilisation de la méthode CONTRA (Bockstaller et al. 2017) Modification des pondérations	SENS: Sensibilité de la parcelle à la lixiviation et à l'érosion DCPR: Défaut de couverture du sol durant une période de risques de ruissellement MESS: Vérification de la structure de l'état du sol	Note entre 0 et 5 Note entre 0 et 1 Note entre 1 et 4	SENS, DCPR sont MESS agrégés par la méthode CONTRA avec les pondérations respectives suivantes 40%, 40% et 20%. Si la variable SENS est favorable alors la variable MERO est égale à 10.	
PP (Pertes en phosphore)	MASC 2.0 & Buczko (2007)	Passage d'une évaluation qualitative à une évaluation quantitative via l'utilisation de la méthode CONTRA (Bockstaller et al. 2017) Intégration de la variable "bande enherbée" comme zone tampon Modification des pondérations	MERO: Erosion X2: Teneur en phosphore du sol (mg/kg) X3: Apport en phosphore (kg P2O5/ha) X4: Largeur de la bande enherbée (m)	Note entre 0 et 10 Valeur entre 10 et 100 Valeur entre 0 et 120 Valeur entre 0 et 9	MERO, X2, X3 et X4 sont agrégés par la méthode CONTRA avec les pondérations respectives suivantes 30%, 30%, 30% et 10%. Si la variable MERO est favorable alors PP=10.	

Annexe 2 : Présentation des indicateurs retenus pour la méthode du Front de Pareto

Indicateur	Description	Référence
RCeso, RCair vol	Sous-indicateurs de l'indicateur I-Phy2 calculant respectivement le risque de contamination des eaux souterraines et de l'air via le processus de volatilisation (échelle de performance sur 10).	Pierlot et al. (2023)
NO ₃	Indicateur de risque de pertes de nitrate (kg N NO ₃ /ha) issue de l'indicateur I-N v.2	Bockstaller et Girardin (2010)
C balance	Bilan carbone (stockage – émissions, en kg éqCO ₂ /ha/an) calculé avec le modèle AMG pour le stockage de C et la méthode SYSTERRE pour les émissions de GES.	Clivot et al. (2019)
Soil structure, landscape	Indicateurs du service écosystémique de structuration du sol et de la valeur paysagère de la succession culturale issue de l'indicateur I-DRo (sans unité).	Keichinger et al. (2021)
Energy production, gross margin, work time	Indicateurs issus de la méthode SYSTERRE calculant respectivement la production d'énergie (en MJ/ha), la marge brute (€/ha) et le temps de travail (h/ha)	ARVALIS (2013)

Références

Pierlot, F., Marks-Perreau, J., Soulé, E., Keichinger, O., Bedos, C., Prevost, L., Van Dijk, P. & Bockstaller, C., 2023. An indicator to assess risks on water and air of pesticide spraying in crop fields. *Science of The Total Environment*, 161000. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.161000>

Annexe 3 : Vue d'ensemble du mode de calcul des indicateurs

Indicateurs d'impact	Abréviation	Calculateur	Référence de l'outil
Contrôle de la compaction du sol	MESS	Feuille de calcul Excel	Soulé et al. (2023b)
Pertes en nitrate	NO3	Feuille de calcul Excel INDIGO I-NO3	Bockstaller et Girardin (2008)
Pertes en phosphore	P_loss	Feuille de calcul Excel	Soulé et al. (2023b)
Indice de Fréquence de Traitement total	Total_TFI	SYSTERRE®	Toqué et al. (2019)
Contamination par les pesticides (eaux souterraines)	RCeso	Feuille de calcul Excel INDIGO I-Ph3	Pierlot et al. (2023)
Contamination par les pesticides (eaux de surface)	RCesu_rd	Feuille de calcul Excel INDIGO I-Ph4	Pierlot et al. (2023)
Contamination par les pesticides (air)	RCair_vol	Feuille de calcul Excel INDIGO I-Ph5	Pierlot et al. (2023)
Volatilisation de l'ammoniaque	NH3	Feuille de calcul Excel INDIGO I-Ph6	Bockstaller et Girardin (2008)
Régulation du climat (gaz à effet de serre)	GHG	SYSTERRE® (émissions totales de GES) Feuille de calcul Excel INDIGO I-N2O (émissions N2O)	Toqué et al. (2019)
Erosion/Lixiviation	MERO	Feuille de calcul Excel	Soulé et al. (2023b)
Pertes en matière organique		Modèle AMG	Clivot et al. (2019)
Pression en phosphore	P_min	SYSTERRE®	Iocola et al. (2020)
Pression en énergie	Energy_pressure	SYSTERRE®	Toqué et al. (2019)
Conservation de la biodiversité	I_BIO	Logiciel DEXI I-BIO	Soulé et al. (2023a)
Services écosystémiques			
Protection physique du sol	Soil_protection	Feuille de calcul Excel	Keichinger et al. (2021)
Structuration du sol	Soil_st	Feuille de calcul Excel	Keichinger et al. (2021)
Fourniture d'azote	N_provision	Feuille de calcul Excel	Keichinger et al. (2021)
Lixiviation de nitrate	N_loss	Feuille de calcul Excel	Keichinger et al. (2021)
Régulation des adventices	Weed	Feuille de calcul Excel	Keichinger et al. (2021)
Régulation des ravageurs	Pest	Feuille de calcul Excel	Keichinger et al. (2021)
Pollinisation	Pollination	Feuille de calcul Excel	Keichinger et al. (2021)
Régulation des maladies	Disease	Feuille de calcul Excel	Keichinger et al. (2021)
Habitat pour les espèces sauvages	Habitat	Feuille de calcul Excel	Keichinger et al. (2021)
Esthétique du paysage	Landscape_value	Feuille de calcul Excel	Keichinger et al. (2021)
Stockage d'eau	Water	Feuille de calcul Excel	Keichinger et al. (2021)
Régulation du climat (stockage de carbone)	C_storage	Modèle AMG	Clivot et al. (2019)
Régulation du climat (albédo)	Albedo	Feuille de calcul Excel	Soulé et al. (2023b)
Bilan carbone	C_balance	Feuille de calcul Excel	Ceschia et al. (2017)
Indicateurs de cause			
Apport total d'azote minéral	N_min	SYSTERRE®	Toqué et al. (2019)
Balance globale azotée	GNB	SYSTERRE®	Toqué et al. (2019)
Balance en phosphore	P_balance	SYSTERRE®	Toqué et al. (2019)
Pourcentage de forêt	Perforest	Calculé avec le logiciel ArcGIS	H. Huin, communication personnelle 17 août 2022
Indicateurs économiques			
Production d'énergie	Energy_prod	SYSTERRE®	Toqué et al. (2019)
Marge brute	Gross_margin	SYSTERRE®	Toqué et al. (2019)
Coût de mécanisation	Meca_cost	SYSTERRE®	Toqué et al. (2019)
Coût de production	Prod_cost	SYSTERRE®	Toqué et al. (2019)
Indicateur social			
Temps de travail	Work_time	SYSTERRE®	Toqué et al. (2019)