

Décembre 2023
volume n°13 / numéro 2
www.agronomie.asso.fr

Agronomie

environnement & sociétés

Référentiels agronomiques & indicateurs

Comment faire face à la diversité des situations ?



La revue de l'association française d'agronomie

ASSOCIATION FRANÇAISE
AGRONOMIE

AGRONOMIE, ENVIRONNEMENT & SOCIÉTÉS

Revue éditée par l'Association française d'agronomie (Afa), enregistrée sous le numéro ISSN 1775-4240

Siège : CAMPUS AGRO PARIS SACLAY-UMR Agronomie-INRAE-AGROPARISTECH 22 place de l'Agronomie
CS80022 91120 Palaiseau Cedex

Contact : revue_aes@agronomie.asso.fr

Site Internet : agronomie.asso.fr

Objectif

AE&S est une revue à comité de lecture et en accès libre destinée à alimenter les débats sur des thèmes clefs pour l'agriculture et l'agronomie. AE&S publie différents types d'articles (scientifiques sur des états des connaissances, des lieux, des études de cas, etc.) mais aussi des contributions plus en prise avec un contexte immédiat (débats, entretiens, témoignages, points de vue, controverses) ainsi que des actualités sur la discipline agronomique.

Contenu sous licence Creative Commons

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.



Directeur de la publication

Antoine MESSÉAN, vice-président de l'Afa, Ingénieur de recherches, Inrae

Rédacteur en chef

Philippe PRÉVOST, Chargé des coopérations numériques à Agreenium

Membres du bureau éditorial

Adeline MICHEL, présidente de l'Afa, responsable du pôle ARAD² chez CER Normandie-Maine

Christine RAWSKI, rédactrice en chef Cahiers Agriculture, Cirad

François KOCKMANN, retraité, ex-directeur de la chambre d'agriculture de Saône et Loire

Olivier RÉCHAUCHÈRE, chargé d'études Direction de l'Expertise, Prospective & Etudes, Inrae

Thierry PAPIILLON, enseignant d'agronomie au LEGTA Laval

Marine DESCAMPS, animatrice Afa

Comité de rédaction

- Marion CASAGRANDE, chargée de mission Inrae
- Yves FRANCOIS, agriculteur
- Clément GESTIN, chargé de projets au Centre d'Ecodéveloppement de Villarceaux
- Laurence GUICHARD, paysanne-boulangère
- Laure HOSSARD, ingénieure de recherche Inrae
- Marie-Hélène JEUFFROY, directrice de recherche Inrae et agricultrice
- Marianne LE BAIL, professeure d'agronomie AgroParisTech
- Antoine MESSEAN, ingénieur de recherches, Inrae
- Adeline MICHEL, ingénieure du service agronomie du Centre d'économie rurale de la Manche
- Jean-Robert MORONVAL, inspecteur d'agronomie de l'enseignement technique agricole
- Christophe NAUDIN, enseignant chercheur en agronomie à l'ESA Angers
- Bertrand OMON, conseiller à la chambre d'agriculture de Normandie
- Thierry PAPIILLON, enseignant au lycée agricole de Laval
- Elise PELZER, chargée de mission Innovation à la chambre d'agriculture des Hauts de France
- Philippe POINTEREAU, directeur du pôle agro-environnement à Solagro
- Philippe PRÉVOST, chargé des coopérations numériques à Agreenium
- Bruno RAPIDEL, directeur UMR AbSys, Cirad
- Aude RIPOCHE, chercheuse et modélisatrice systèmes de cultures plurispécifiques Cirad
- Jean-Marie SERONIE, consultant
- Jean-Guy VALETTE, ex-directeur du syndicat des négoce agricoles
- Jacques WERY, chef du projet stratégique de l'Institut Agro

Assistants éditoriaux

Marine DESCAMPS, animatrice Afa

Conditions d'abonnement

Les numéros d'AE&S sont principalement diffusés en ligne. La diffusion papier n'est réalisée qu'en direction des adhérents de l'Afa ayant acquitté un supplément (voir conditions sur agronomie.asso.fr/adhesion)

Périodicité

Semestrielle, numéros paraissant en juin et décembre

Archivage

Tous les numéros sont accessibles à l'adresse agronomie.asso.fr/aes

Soutien à la revue

- En adhérant à l'Afa via le site Internet de l'association (<http://www.agronomie.asso.fr/espace-adherent/devenir-adherent/>). Les adhérents peuvent être invités pour la relecture d'articles.
- En informant votre entourage au sujet de la revue AE&S, en disséminant son URL auprès de vos collègues et étudiants.
- En contactant la bibliothèque de votre institution pour vous assurer que la revue AE&S y est connue.
- Si vous avez produit un texte intéressant traitant de l'agronomie, en le soumettant à la revue. En pensant aussi à la revue AE&S pour la publication d'un numéro spécial suite à une conférence agronomique dans laquelle vous êtes impliqué.

Instructions aux auteurs

Si vous êtes intéressé(e) par la soumission d'un manuscrit à la revue AE&S, les recommandations aux auteurs sont disponibles à l'adresse suivante : agronomie.asso.fr/aes-presentation

À propos de l'Afa

L'Afa a été créée pour faire en sorte que se constitue en France une véritable communauté scientifique et technique autour de cette discipline, par-delà la diversité des métiers et appartenances professionnelles des agronomes ou personnes s'intéressant à l'agronomie. Pour l'Afa, le terme agronomie désigne une discipline scientifique et technologique dont le champ est bien délimité, comme l'illustre cette définition courante : « Etude scientifique des relations entre les plantes cultivées, le milieu [envisagé sous ses aspects physiques, chimiques et biologiques] et les techniques agricoles ». Ainsi considérée, l'agronomie est l'une des disciplines concourant à l'étude des questions en rapport avec l'agriculture (dont l'ensemble correspond à l'agronomie au sens large). Plus qu'une société savante, l'Afa veut être avant tout un carrefour interprofessionnel, lieu d'échanges et de débats. Elle se donne deux finalités principales : (i) développer le recours aux concepts, méthodes et techniques de l'agronomie pour appréhender et résoudre les problèmes d'alimentation, d'environnement et de développement durable, aux différentes échelles où ils se posent, de la parcelle à la planète ; (ii) contribuer à ce que l'agronomie évolue en prenant en compte les nouveaux enjeux sociétaux, en intégrant les acquis scientifiques et technologiques, et en s'adaptant à l'évolution des métiers d'agronomes.

LISEZ ET FAITES LIRE AE&S !

Sommaire

AVANT-PROPOS

P7 Avant-propos

Philippe PRÉVOST, Rédacteur en chef, et Antoine MESSÉAN, vice-président de l'AFA

P9 Éditorial

Philippe PRÉVOST, Aude Alaphilippe, Aude Ripoche, Guenaëlle Hellou, Christian Bockstaller, François Kockmann et Philippe COUSINIÉ

PARTIE 1 : LES ENJEUX DES REFERENTIELS ET DES INDICATEURS EN AGRONOMIE

P15 Références et référentiels techniques en agronomie : de quoi s'agit-il ? Que faut-il faire ?

Jean BOIFFIN, François KOCKMANN, Rémi KOLLER et André POUZET

P55 Quels indicateurs pour l'évaluation des systèmes agricoles en transition agroécologique ?

Christian BOCKSTALLER, Aude ALAPHILIPPE et Frédérique ANGEVIN

P73 Référentiels et nouveaux indicateurs pour fonder une agriculture régénératrice

Olivier HUSSON, Jean-Pierre SARTHOU et Michel DURU

P91 INDIC, une base de données pour aider à s'orienter dans la jungle des méthodes et indicateurs d'évaluation de la durabilité

Christian BOCKSTALLER, Emma TROMP, Elisabeth HUFSCMITT et Frédérique ANGEVIN

PARTIE 2 : LA CONCEPTION D'INDICATEURS POUR PRENDRE EN COMPTE LES EVOLUTIONS DANS L'EVALUATION DES SYSTEMES AGRICOLES

P111 Indicateurs fonctionnels et mécanistes pour évaluer le phosphore phyto-disponible du sol

Christian MOREL

P125 De nouveaux indicateurs innovants pour répondre à l'évolution des cahiers des charges sur les performances environnementales des exploitations agricoles

Emma SOULE, Philippe MICHONNEAU, Nadia MICHEL et Christian BOCKSTALLER

P145 Des indicateurs opérationnels sur la biologie des sols, base d'une prestation de diagnostic-conseil auprès des agriculteurs

Christian BARNEOUD

P155 Rendre compte des performances de systèmes horticoles diversifiés agro-écologiques : Construction d'un cadre générique de restitution des résultats avec et pour les agriculteurs

Aude ALAPHILIPPE, Alexia LEFEVRE, Solène BORNE, Josian DELAUNAY, Rachel GRAINDORGE, René-Claude JUDITH, Pierre-Eric LAURI, Jean-Michel RICARD, Sylvaine SIMON, Luc VANHUFFEL et Joël HUAT

P167 Mieux appréhender les situations d'usages d'outils et indicateurs agronomiques pour mieux les concevoir : retour d'expériences menées avec l'appui d'IDEAS

Thibault Lefeuvre, Lorène Prost, Aude Alaphilippe, Frédérique Angevin, Nathalie Colbach, Catherine Pasquier, Wilfried Queyrel, Jean Villerd, Marianne Cerf

P179 Toolbox for crop diversification, un outil issu du projet DiverImpacts pour identifier des ressources disponibles pour l'évaluation, le suivi et l'accompagnement des trajectoires de diversification

Aline VANDEWALLE et Marion DES ROSEAUX

P193 Une démarche collective pour gérer l'azote par objectifs de résultats : le projet Gazelle

Marion DELESALLE, Justine CHAUVIN, Aïcha RONCEUX et Marie-Hélène JEUFFROY

P211 Méthodologie d'accompagnement pour l'arrêt de l'utilisation du glyphosate dans les fermes de l'enseignement technique agricole

Corentin CLEMENT

P223 La méthode IDEA4 comme outil de réflexion pour la reconception de systèmes agricoles : exemple de deux établissements d'enseignement engagés dans le dispositif EcoPhyto'TER

Fleur MEYNIER, INES RODRIGUES et Christian PELTIER

P237 Enquêter le travail en tant qu'agronomes système : essais méthodologiques en Colombie et au Bénin

Teatske BAKKER et Andrés VEGA-MARTINEZ

P253 Orienter les pratiques culturales par la recherche d'indicateurs relatifs à la fertilité biologique des sols – Témoignages de chambres d'agriculture

Christophe BARBOT, Cédric BERGER, Pascal GUILBAULT, Virginie RIOU et Joëlle SAUTER

P261 Construction et déploiement de l'agronomie dans et par la formation – Traits saillants de son évolution et enjeux pour l'avenir

Thierry DORÉ, Jean-Jacques GAILLETON, Philippe PRÉVOST, Nadia CANSIAN, Jacques WERY, Antoine MESSÉAN et François PAPY



AVANT-
PROPOS

Avant-Propos

Philippe Prévost (*Rédacteur en chef*), Antoine Messéan (*vice-président de l'Afa*) et Adeline Michel (*Présidente de l'Afa*)

Le nouveau numéro d'Agronomie, environnement & sociétés que nous vous livrons s'inscrit dans la lignée des autres numéros deux des années impaires, en poursuivant la réflexion de l'Afa sur l'approche clinique¹ en agronomie.

Pour ce numéro, le sujet que nous avons choisi de traiter représente un enjeu crucial pour les agronomes, car malgré toutes les évolutions, que ce soit dans les connaissances, les innovations, ou les compétences des acteurs, il est toujours attendu de la part de l'agronomie un accompagnement des agriculteurs pour l'aide à la décision, qu'elle soit stratégique ou tactique. Mais si la production de références techniques a été consubstantielle du développement de l'agronomie, en tant que discipline scientifique et technique, les transitions agricoles en cours pour faire face à un contexte climatique et socio-économique instable et incertain modifient fortement les régimes de production et de diffusion de connaissances, et par voie de conséquence interrogent le rôle, la façon de produire et la diffusion de « références » auprès des praticiens. Si l'expérimentation reste une voie importante de la recherche-développement, l'approche clinique de diagnostic des situations singulières d'agriculteurs en vue de proposer un accompagnement personnalisé fait de plus en plus l'objet de recherches et d'innovations.

Au-delà du glissement sémantique, par la substitution du terme « référence technique » par les termes « référentiels et indicateurs », il faut donc nous interroger collectivement sur la façon de répondre au mieux au besoin de données agronomiques fiables pour les agriculteurs qui, si elles ne constituent plus aussi fréquemment des normes à prescrire, sont des aides essentielles au pilotage stratégique et tactique des cultures et des entreprises, même dans un environnement instable et incertain.

Ce numéro engage ce travail que notre communauté doit mener dans les années à venir pour offrir aux agriculteurs d'autres choix que celui de références techniques qui ne sont plus adaptées au contexte actuel de production et de gestion agricole, ou celui d'accès à une base de données de référentiels et d'indicateurs que seule une minorité d'agriculteurs sera en mesure d'utiliser, compte tenu de la complexité d'appropriation ou de leur faible adéquation aux besoins.

Vous trouverez donc dans ce numéro des premières réflexions très argumentées sur la place et le rôle des références techniques en agronomie et sur les évolutions en cours en contexte de transitions, ainsi que différentes expériences qui rendent compte de démarches de conception et/ou d'usages de référentiels et/ou indicateurs dans des pratiques de recherche, de recherche-développement, d'innovation de terrain et/ou de partage d'expériences et d'observations au sein de collectifs.

A la lecture de ce numéro, il apparaît clairement que la question de la production et de la diffusion de données agronomiques pouvant servir de références aux praticiens n'est pas épuisée. Car ce sujet représente un enjeu autant théorique que pratique pour les agronomes.

¹ Depuis 2017, chaque numéro n°2 de l'année impaire porte sur les démarches cliniques en agronomie. Pour rappel, dans le numéro AES 7-2 de décembre 2017, nous avons précisé dans le texte éditorial (2017) : « L'agronomie clinique n'a pas de définition réellement stabilisée. Dans ce numéro, nous l'entendons comme l'agronomie qui étudie l'agroécosystème en vue d'établir un diagnostic agronomique de son fonctionnement pour proposer des améliorations correspondant aux compromis souhaités par l'agriculteur (intégrant les objectifs écologiques, économiques et sociaux) ». Dans le numéro AES 9-2 de décembre 2019, Kockmann et al. (2019) analysent les spécificités de la démarche clinique en agronomie, d'une part en comparant son usage dans d'autres disciplines, et d'autre part en l'analysant dans la relation agriculteur-conseiller. Et enfin, dans le numéro AES 11-2 de décembre 2021, nous avons traité des démarches cliniques en agronomie à l'échelle des territoires.

Dans sa dimension conceptuelle et méthodologique, le diagnostic et le pronostic à partir d'évaluation multicritères, l'aide à la décision à différentes échelles spatio-temporelles, et les usages potentiels des différents outils (aide à la décision, accompagnement, outils de politique publique...) demandent la clarification des termes de référence technique, de référentiel agronomique, d'indicateur, voire d'indice, ainsi que la conception de nouveaux objets pour accompagner les praticiens.

Et dans sa dimension technique, ce sujet doit approfondir les besoins actuels et à venir des agriculteurs dans leur diversité (références techniques, connaissances actionnables et/ou outils d'aide à la décision) et les moyens de construire la décision du praticien (place de l'observation sensible et rôle de l'analyse de données, dans un contexte de développement de l'intelligence artificielle ; prise en compte des politiques publiques...).

Pas de doute, nous reviendrons dans quelque temps avec un nouveau numéro sur le sujet !

Bonne lecture

Remerciements :

Aux membres du comité de numéro :

Christian Bockstaller, Aude Alaphilippe, Aude Ripoche, Guenaëlle Hellou, François Kockmann, Philippe Cousinié, Philippe Prévost

Aux relecteurs et relectrices : Joël Aubin, Nadine Andrieu, Frédérique Angevin, Elise Audouin, Alain Braumann, Marion Casagrande, Christian Candalh, Benoît Dedieu, Yves François, Philippe Hinsinger, Laure Hossard, François Kockmann, François Laurent, Marianne Le Bail, Christine Leclercq, Gilles Lemaire, Christine Le Souder, Guillaume Martin, Antoine Messéan, Marc Miquel, Christophe Naudin, Thierry Papillon, Elise Pelzer, Etienne Pilorgé, Philippe Prévost, Jean-Luc Régnard, Mathias Sexe, Solène Pissonier

A l'équipe de suivi et réalisation de la chaîne éditoriale :

Marine Descamps et Philippe Prévost



ÉDITORIAL

Des référentiels agronomiques et des indicateurs pour la pratique agricole : comment faire face à la diversité des situations dans un contexte de transitions

Philippe Prévost¹, Christian Bockstaller², François Kockmann³, Aude Ripoché⁴, Aude Alaphilippe², Philippe Cousinié⁵ et Guenaëlle Hellou⁶

¹ Agreenium, l'Alliance de la formation et la recherche pour l'agriculture, l'alimentation, l'environnement et la santé globale, auteur correspondant :

philippe.prevost@agreenium.fr,

² Inrae, ³ Ex-directeur de la chambre d'agriculture de Saône et Loire, ⁴ Cirad ⁵ MASA-DGER, SESRI/SDRIC/BDAPI/Réso'them, ⁶ ESA Angers

Ce numéro de la revue *Agronomie, environnement & sociétés* s'inscrit dans la filiation des autres numéros dédiés à la compréhension et à la valorisation des démarches cliniques en agronomie.² Après avoir traité de la diversité des approches cliniques aux échelles de la parcelle et du système de culture (AES 9-2) puis à l'échelle du territoire (AES 11-2), le choix éditorial de ce numéro est de rendre compte des évolutions dans la conception et les usages des références agronomiques servant la prise de décision des agriculteurs dans leurs choix de pilotage, stratégique et/ou tactique, dans le contexte actuel de transitions agricoles. Car si la production de références agronomiques constitue depuis les années 1960 le cœur de métier des agronomes du système de développement agricole (Kockmann et Pouzet, 2022), la dynamique d'élaboration de ces références a fortement évolué depuis ces dernières décennies, avec d'une part l'enrichissement des connaissances et des méthodes et d'autre part la prise en considération des enjeux environnementaux et plus largement des exigences de la triple performance, économique, écologique et sociale. La création de référentiels agronomiques et d'indicateurs se situe en amont de la fonction de conseil-prescription-accompagnement ; c'est une ressource précieuse pour venir en appui des démarches cliniques face à la singularité et à la diversité des situations.

Que ce soit dans la compréhension du fonctionnement de l'agroécosystème ou dans la mise en œuvre de techniques culturales, les agronomes sont, de fait, confrontés à une diversité de plus en plus grande des situations de terrain qu'ils rencontrent dans la transition agroécologique. D'une part, la variabilité des aléas climatiques et des régulations biologiques s'accroît avec le dérèglement climatique, et interroge régulièrement la mobilisation de résultats d'expérimentation qui sont nécessairement limités en termes de diversité spatiale et temporelle des conditions de milieu. D'autre part, la nécessité des transitions agricoles, écologique et énergétique, crée une dynamique de diversification des systèmes de culture, pour laquelle les références scientifiques et techniques sont faibles (comparativement aux systèmes simplifiés qui ont bénéficié de recherche-développement ciblés sur les espèces et les pratiques dominantes) et dont la construction demande la prise en compte d'une gestion adaptative face aux aléas et à la singularité des situations agronomiques. Ainsi, de nouveaux systèmes techniques font l'objet d'un véritable engouement, alors que les références scientifiques et techniques sont en cours d'acquisition (agroforesterie, agriculture de conservation, permaculture...), ou sont même difficiles à objectiver (biodynamie...), alors qu'ils risquent par ailleurs d'être obsolètes très vite dans un contexte changeant et incertain.

Face à cela, comment les agronomes de la recherche et du développement et les praticiens

² AES 7-2 - Les ateliers Terrain : pour une démarche participative en agronomie clinique (décembre 2017) ; AES 9-2 - Démarche clinique en agronomie & outils pour les agriculteurs et leurs conseillers (décembre 2019) ; AES 11-2 - Quelles démarches cliniques en agronomie dans les territoires ? (décembre 2021)

agricoles s'organisent-ils pour construire des référentiels et des indicateurs adaptés à la diversité des situations agronomiques de terrain ? Quels acquis des expériences vécues ? Quelles nouvelles méthodes (démarches de réseaux, collectifs militants, recherche-intervention, innovation ouverte...) ? Quels nouveaux outils (outil d'évaluation multi-critères, spatialisation des informations...)?

Dans ce numéro est ainsi proposée une diversité de textes que nous avons organisée en trois parties. La première partie est composée d'un ensemble d'articles qui permettent au lecteur d'avoir une vision de l'état des lieux de l'évolution, toujours en cours, des enjeux liés à la création de référentiels et d'indicateurs en agronomie. Puis les deux autres parties présentent une diversité de textes qui rendent compte de recherches et d'expériences, d'une part dans la conception de nouveaux types de références et d'autre part, dans leurs usages.

Les enjeux des référentiels et des indicateurs en agronomie

Le texte introductif de Boiffin et al., centré sur les références techniques en agronomie, couvre largement le sujet, à la fois dans son périmètre et avec le recul historique nécessaire. Il pose ainsi clairement les enjeux de la conception et des usages des références techniques en agronomie. La démarche, empirique, prenant appui sur des cas concrets, conduit à identifier un schéma de caractérisation d'une référence technique en agronomie (structure invariante, basée sur un modèle de connaissance agronomique interférant avec les méthodes d'acquisition des données). Ainsi se dessine un socle conceptuel et méthodologique commun avec des exigences dans l'élaboration des références et référentiels techniques en agronomie. Abordant leur renouvellement induit par le contexte des transitions agricoles, les auteurs amorcent une réflexion transversale notamment sur les usages et la diffusion ; ils proposent en fait une véritable ambition programmatique nécessitant d'investir à l'avenir mais surtout une organisation collective des agronomes des différents métiers.

Les deux textes suivants sont des illustrations des chantiers dans lesquels les agronomes doivent investir pour s'inscrire dans la trajectoire globale de transition agroécologique. Bockstaller, Alaphilippe et Angevin, qui s'appuient sur les propositions de la FAO de prise en compte d'une palette de critères et d'indicateurs d'évaluation des différentes dimensions de la durabilité en agriculture, définissent un cadre conceptuel et une typologie d'indicateurs pour l'évaluation des impacts environnementaux et des services écosystémiques. Cette approche permet d'évaluer le fonctionnement de l'agroécosystème et d'envisager les effets prédictifs de la transition agroécologique. Et Husson et al., à partir de l'analyse des limites des agricultures écologiques dans la production de services écosystémiques performants (agriculture biologique, agriculture de conservation, agriculture régénératrice) et des connaissances récentes sur les processus écologiques favorables aux différents services écosystémiques, proposent un référentiel pour la santé des sols qui pourrait être à la base d'indicateurs pour une approche agronomique de l'agriculture régénératrice.

Enfin, toujours dans une perspective de cadrage des enjeux des référentiels et des indicateurs, Bockstaller, Tomp et al. témoignent de la prolifération des chercheurs dans la production de méthodes d'évaluation de la durabilité et d'indicateurs associés, à travers la description de la base de données « INDIC ». Cette base de données alimentée par les chercheurs vise à informer les agronomes des méthodes existantes en vue de les aider à s'orienter dans une offre déjà pléthorique, alors que l'heure est au recul conceptuel et méthodologique.

La conception d'indicateurs pour prendre en compte les évolutions dans l'évaluation des systèmes agricoles

Cette deuxième partie est composée de quatre textes.

Morel rend compte des nouvelles connaissances scientifiques, en particulier celles sur le fonctionnement de la rhizosphère, qui amènent à proposer de nouveaux indicateurs d'évaluation du phosphore phytodisponible dans le sol, en vue d'améliorer à terme la qualité des prescriptions de la fertilisation phosphatée. Avant le déploiement à grande échelle de ces indicateurs, des travaux supplémentaires restent encore nécessaires pour généraliser leur valeur agronomique et leur transfert vers des laboratoires d'analyse de sol.

Soulé et al., dans une démarche de recherche-intervention au sein d'une coopérative agricole engagée dans une démarche de responsabilité sociale et environnementale ambitieuse, analyse la trajectoire de transition agroécologique des adhérents. Cela s'est traduit par la conception de nouveaux indicateurs environnementaux (indicateurs de cause), mais également par la conception d'indicateurs d'impacts prédictifs (indicateurs d'effets) qui, combinés, permettent de mieux cerner les conditions pour réduire les impacts et accroître les services écosystémiques.

Barnéoud témoigne d'une démarche de diagnostic-conseil et de formation auprès des agriculteurs, basée sur les rôles des différentes formes de la matière organique du sol, distinguées en quatre compartiments en interactions. La démarche s'appuie sur des indicateurs qualifiant et quantifiant chacun des quatre pools, retenus par le laboratoire Celesta-lab, qui a valorisé les connaissances scientifiques acquises sur la qualité biologique des sols. Le recueil de plusieurs points de vue (céréaliériste, éleveur, vigneron, agronome) confirme l'intérêt de cette démarche d'accompagnement.

Enfin, le dernier texte d'Alaphilippe et al. est d'une autre nature, puisqu'il décrit une démarche de co-conception chercheurs-praticiens et compare deux dispositifs de recherche-action au sein de systèmes horticoles très diversifiés, dont l'objectif est de réduire l'usage des produits phytosanitaires. Dans le contexte de ces systèmes, multi-fonctions, multi-services et évolutifs, le partage des connaissances et la co-construction d'indicateurs de performance au sein de collectifs ou de territoires sont une autre façon de mobiliser de nouveaux référentiels et indicateurs.

Les usages des référentiels et des indicateurs agronomiques dans diverses situations agronomiques

Cette dernière partie regroupe sept textes portant sur la diversité des usages des référentiels et des indicateurs par les praticiens.

Le premier texte de Lefeuvre et al., à destination des concepteurs d'indicateurs, témoigne d'un travail collaboratif entre des agronomes et des ergonomes dans un contexte de projets de recherche-développement visant à fournir des outils d'aide à la décision pour les praticiens. Ce travail, qui s'appuie sur la méthodologie développée par le réseau IDEAS³, à partir d'un diagnostic de situations d'usage et de tests en situation d'usage, permet aux concepteurs d'enrichir leurs représentations sur les futurs usagers et leurs façons d'utiliser les outils, mais surtout de clarifier les usages potentiels, pour mieux adapter les outils aux utilisateurs.

³ IDEAS (initiative for design in agri-food systems) est un réseau de chercheurs qui mène trois types d'activités : la recherche pour et sur les méthodes de conception, la formation des acteurs et étudiants pour diffuser ces méthodes, et l'accompagnement de projets de conception, via une [Plateforme d'appui](#), en partenariat avec différents acteurs de l'innovation (développement agricole, chercheurs, industriels...).

Puis Vandewalle et Des Roseaux, qui présentent l'outil « Toolbox for crop diversification », produit dans le cadre du projet européen DiverIMPACTS⁴, visant à faciliter la diversification des cultures, montrent l'importance d'accéder à des ressources s'appuyant sur un référentiel partagé, en vue du diagnostic et de l'accompagnement de la diversification des assolements dans les territoires. Delesalle et al. rendent compte d'une démarche d'accompagnement collectif pour gérer l'azote par obligation de résultats dans des territoires. Cette démarche, qui s'appuie d'une part sur un diagnostic initial partagé par le groupe d'agriculteurs et sur la définition d'objectifs communs, et d'autre part sur la mise en place d'un tableau de bord pour le suivi d'un certain nombre d'indicateurs, montre toute sa pertinence, tant dans l'intégration de connaissances issues de la recherche et des praticiens que par l'intérêt pour les agriculteurs d'une vision systémique du lien milieu-pratiques fournie par le tableau de bord. L'expérience, qui illustre l'intérêt du changement de paradigme, « renoncer à un encadrement rigide sur une obligation de moyens pour un accompagnement vers des objectifs de résultats » interroge aussi les politiques publiques.

Clément analyse une démarche d'accompagnement de 13 exploitations de lycées agricoles dans l'abandon du glyphosate, consistant à préciser les problématiques communes et spécifiques, à injecter des connaissances d'experts dans le collectif et à proposer des projets d'évolution des systèmes et des pratiques dans chacune des situations pour atteindre l'objectif commun. Au-delà des indicateurs agronomiques (comme l'IFT - Indice de fréquence de traitement), ce projet permet de travailler sur des indicateurs de réussite du changement dans la ferme ou même des indicateurs d'évolution de la pédagogie.

Meynier et al. rendent compte de l'expérience de deux établissements d'enseignement agricole engagés dans un dispositif de réduction des produits phytosanitaires (Ecophyto'Ter) utilisant la méthode IDEA4⁵, non plus comme méthode de diagnostic de la durabilité de l'exploitation agricole, mais en utilisant les indicateurs de la méthode pour accompagner la réflexion sur le projet de l'exploitation agricole. Même si la mobilisation de la méthode IDEA4 présente certaines contraintes, son usage a montré de fortes potentialités pédagogiques au-delà de son intérêt pour la construction de trajectoires d'évolution du système de l'exploitation agricole.

Barbot et al., quant à eux, présentent différentes expériences menées au sein des chambres d'agriculture, le plus souvent dans le cadre de projets financés par le casDAR, finalisés sur la prise en compte de démarches agroécologiques. Les projets portent sur la mobilisation collective locale pour la compréhension et l'action au profit des propriétés biologiques des sols. Ces expériences montrent l'engouement des agriculteurs dans des recherches-formations-actions pour le partage de référentiels et d'indicateurs leur permettant de faire évoluer leurs systèmes de culture.

Enfin, Bakker et Vega-Martinez se sont intéressées aux évolutions du travail dans des exploitations agricoles, au Bénin et en Colombie, en mobilisant des indicateurs de trajectoires du travail pour acquérir une compréhension globale de l'exploitation agricole. Selon elles, cette méthodologie reste à perfectionner pour mieux répondre aux problématiques du travail en production végétale mais leur analyse encourage les agronomes à évaluer les différentes dimensions du travail en agriculture et leur évolution⁶.

A l'issue de ce numéro, nous saisissons encore mieux les enjeux, affichés dans la première partie, que représente le travail collectif des agronomes à mener dans les prochaines années sur ce sujet des référentiels agronomiques et des indicateurs pour l'action. Car si l'un des atouts de l'agronome

⁴ <https://www.diverimpacts.net/>

⁵ Méthode d'évaluation de la durabilité des exploitations agricoles (<https://methode-idea.org/>)

⁶ Ce sujet sera l'objet du prochain numéro de notre revue, à paraître en juin 2024.

est de pouvoir combiner des connaissances (issues de la recherche et de la pratique), des échelles (spatiales et temporelles), des systèmes (de la parcelle au territoire), son rôle est de mettre ce savoir-faire au service de l'action des praticiens en rendant opérationnelles ces connaissances par l'outillage conceptuel et méthodologique le mieux adapté aux besoins des différentes parties prenantes (agriculteurs, acteurs des territoires, représentants professionnels et politiques...).

Le chantier est immense, mais il représente un beau chemin d'avenir pour les agronomes de tous les métiers !

Nous vous souhaitons une bonne lecture !

Et un bonus pour les agronomes enseignants !

Nous avons ajouté dans ce numéro un texte en varia de Doré et al. : « Construction et déploiement de l'agronomie dans et par la formation – Traits saillants de son évolution et enjeux pour l'avenir ». Ce texte est issu d'un webinaire de juin 2023 valorisant le chapitre portant sur l'enseignement de la Fabrique de l'agronomie (Ed. Quae). A une période où les enseignants d'agronomie se demandent s'il ne serait pas préférable pour eux de se nommer enseignants d'agroécologie, il nous a paru intéressant de produire ce texte car, au-delà de résumer un chapitre d'ouvrage, il discute de certains défis pour la discipline. Or, en se référant à ce qui est interrogé dans ce numéro, à savoir l'enjeu d'opérationnalisation des connaissances pour les praticiens, il est essentiel que les enseignants d'agronomie en activité aient pleine conscience de leur rôle majeur à jouer dans les années à venir pour poursuivre voire amplifier leur contribution, comme ce fut le cas dans les années 1970, à la production des concepts et des outils de l'agronomie pour les agricultures de demain.

Références

Kockmann, F., Pouzet, A. 2022. Contribution du système de développement agricole à la dynamique de l'agronomie. In Boiffin et al., *La fabrique de l'agronomie*, Paris Quae, pp363-408.

Boiffin, J., Doré, T., Kockmann, F., Papy, P., Prévost, P., 2022. *La fabrique de l'agronomie*. Paris Quae, 496p.



Références et référentiels techniques en agronomie : De quoi s'agit-il, que faut-il faire ?

Jean Boiffin*, François Kockmann**, Rémi Koller***, André Pouzet****

* Inra devenu Inrae (retraité)

**Chambre d'agriculture de Saône et Loire (retraité)

*** Association pour la Relance Agronomique en Alsace (retraité)

**** Terres Inovia (retraité)

Auteur correspondant : jean.boiffin.pro@gmail.com

Résumé

Cet article vise à relancer une dynamique d'échanges et de réflexion prospective sur les références techniques en agronomie (RTA) et référentiels correspondants, en lui donnant un socle conceptuel et méthodologique commun. La démarche proposée est empirique. À partir de quatre cas, on identifie les aspects fondamentaux du contenu et de la structure d'une RTA. Cette approche, étendue à une collection d'exemples plus large, permet de valider un schéma général de caractérisation des RTA. On précise quelques-unes des problématiques qui découlent de cette analyse, face à la nécessité de renouvellement qu'induisent les transitions en agriculture. Sont également discutés les critères permettant d'établir un état des lieux et les modalités d'usage des RTA et des référentiels. La conclusion insiste sur la nécessité d'identifier l'élaboration des RTA et des référentiels comme défi méthodologique transversal pour le système de recherche-développement agronomique.

Mots clés : références techniques ; référentiels ; agronomie ; étude de cas ; contenu et démarche d'élaboration ; diversité ; transitions.

Abstract

In agriculture, technical decisions and support to decision making need to be supplied with adequate references. In this paper, we define a technical reference in agronomy (TRA) as information that can be used (i) to take a decision in a given agricultural context, by choosing an operating process suited to the situation and objectives of the farmer (and, more broadly, of the stakeholder(s) concerned), or (ii) to formulate a diagnosis of a past action. A reference repository is the database resulting from the collection and grouping of TRAs relating to one or more technical fields, so as to make them accessible to, and usable by, different types of stakeholders, first and foremost farmers. Agricultural transitions imply a large and deep renewal of existing TRAs and corresponding repositories.

The aim of this article is a preliminary contribution to this renewal, by providing a common conceptual and methodological framework, following from an empirical approach. Based on 4 case studies, the fundamental aspects of the content and structure of a TRA are identified. This first step is extended to a wider collection of examples (see appendix). This enables us to validate a general scheme for characterizing TRAs, and also to highlight the wide diversity of forms taken by this general scheme.

In the second section of the paper, some of the issues arising from this analysis are identified, in view of the renewal required by transitions. Criteria for establishing the state of the art are discussed, as are the ways in which RTAs and reference repositories can be used. The conclusion stresses the need to identify the development of TRAs and reference repositories as a major issue, subject of exchange, and field of methodological research, for the agronomic system of research and development.

Keywords: technical reference in agronomy (TRA); reference repositories; agronomy; case studies; content and development of TRAs; diversity of TRAs; renewal of TRAs.

Introduction

La modernisation de l'agriculture, et les multiples transitions qui en ont pris la suite, se sont accompagnées d'un considérable élargissement des sources d'information à partir desquelles l'agriculteur fait ses choix et prépare ses interventions techniques. Les principes de raisonnement et règles de décision qu'il met en œuvre sont pour partie élaborés et mis en forme au sein d'un système de recherche-développement agronomique qui s'est fortement développé depuis 1945 (Evrard et Vedel, 2003 ; Rémy et al, 2006). Ils ne proviennent plus seulement de sa propre expérience, ou de celle de ses parents et voisins, mais sont importés de l'extérieur de l'exploitation, par l'intermédiaire de divers canaux – conseillers agricoles, agents commerciaux, presse technique, groupes d'échanges au sein desquels la mutualisation des expériences n'a désormais plus de limite géographique, grâce à Internet. Ils sont aussi de plus en plus étayés sur des connaissances agronomiques de portée générale, non contingentes de leur contexte d'acquisition ou d'application.

Devenues pour partie exogènes et génériques, les procédures de raisonnement technique doivent, dans le même temps, être appliquées à une infinité de situations particulières, dans le temps et dans l'espace. C'est par l'intermédiaire des *références et référentiels techniques*, que s'opère cette articulation. Alors même que toutes les disciplines agronomiques autres que l'agronomie *sensu stricto* sont utilisatrices et productrices de références techniques⁷, la variabilité des contextes de production végétale confère à ces données, à leur obtention et à leur traitement, une spécificité propre à l'agronomie *sensu stricto*. On parlera donc ici de *références techniques en agronomie* (RTA). La réflexion présentée dans cet article part d'une définition large de cette notion, très proche de celles proposée par d'autres auteurs (Mouchet et al, 2011 ; Petit et al, 2012 ; Vindras et al, 2013 ; Schaub, 2021) : *information qui permet de prendre une décision technique dans un contexte donné, en choisissant une modalité opérationnelle adaptée à la situation et aux objectifs de l'agriculteur (et plus largement du ou des acteurs concernés), ou de formuler un diagnostic sur une action passée*. On entend par *référentiel* la base de données qui résulte de la collecte et du regroupement de RTA relatives à un ou plusieurs domaines techniques, de façon à les rendre accessibles à, et utilisables par, différents types d'acteurs, au premier rang desquels les agriculteurs.

L'élaboration des références techniques, l'établissement et l'actualisation des référentiels et leur valorisation constituent depuis longtemps une activité majeure du système de recherche-développement agronomique (Kockmann et Pouzet, 2022). Mais les transitions agricoles⁸ font apparaître des enjeux qui dépassent de loin l'actualisation et l'extension des RTA et référentiels existants pour les adapter à de nouveaux contextes climatiques, écologiques et socio-économiques. Le défi est à la fois quantitatif - accroissement de plusieurs ordres de grandeur du volume de RTA à produire -, et qualitatif - élaboration de nouveaux types de références, portant sur des sujets et niveaux d'organisation inédits, et utilisables de façon beaucoup plus flexible, dans le cadre d'un régime d'*innovation participative* (Meynard et al, 2022). Pour relever ce défi, et limiter le risque d'éparpillement, il faut se donner des repères quant aux objectifs à atteindre, non seulement vis-à-vis des thèmes à couvrir, mais aussi et surtout vis-à-vis des démarches à suivre pour élaborer les RTA et référentiels correspondants. À la base, cela implique une vision claire de ce en quoi consiste une RTA, au-delà de sa définition terminologique.

Dans la période de construction de l'agronomie en tant que discipline, une réflexion sur les références a été amorcée (Sebillotte, 1978), et s'est concrétisée par des propositions de démarches adaptées à différents thèmes (Lachaud, 1960 ; Dürr et al, 1979 a et b ; Capillon, 1985 ; Limaux et Meynard, 1992 ; Tirel, 1993 ; Aubry, 1994 ; Urbano, 1996). Au début des années 1980, un des trois grands axes du programme de Relance agronomique, visant à redynamiser le Développement

⁷ C'est par exemple le cas de la pathologie végétale et de l'entomologie, comme le montre la lecture des sommaires du périodique *Phytoma*. C'est aussi le cas de la zootechnie, comme illustré par le célèbre *Manuel de nutrition animale*, réédité régulièrement. L'économie rurale s'intéresse elle aussi aux références : en 1960, la revue éponyme publie un numéro spécial intitulé : *La recherche des références nécessaires en économie rurale*.

⁸ Les différents aspects et implications de cette notion sont développés dans le numéro 12.2 de la revue *AE&S*.

Agricole, était explicitement consacré à l'élaboration des références agronomiques au niveau régional⁹. Mais la réflexion transversale semble par la suite avoir été délaissée, alors même que le caractère crucial des RTA était souligné en de nombreuses occasions (Hopquin et al, 1996 ; Urbano et al, 1996 ; Collectif, 1996), et que les revues techniques majeures leur consacraient une place de plus en plus importante¹⁰. L'article qui suit vise à relancer une dynamique d'échanges et de réflexion prospective sur les RTA et référentiels, en lui donnant une esquisse de socle conceptuel et méthodologique commun.

La démarche mise en œuvre est empirique, consistant en l'analyse comparative de différents exemples. Dans une première étape, à partir d'un petit nombre de cas-types contrastés, on cherchera à identifier les aspects fondamentaux du contenu et de la structure d'une référence technique en agronomie. Les hypothèses issues de cette première approche sont confrontées à une collection d'exemples plus large présentée en annexe. Cette extension permet non seulement de conforter le cadre d'analyse proposé, mais aussi de caractériser la diversité des référentiels. Dans une deuxième étape, on mettra en évidence quelques-unes des problématiques qui découlent de cette analyse, face à la nécessité de renouvellement qu'induisent les transitions. La réflexion aboutit à une recommandation d'ensemble consistant à mieux identifier les références et référentiels techniques, comme enjeu stratégique, sujet d'échanges et domaine d'activité, au sein du système de recherche-développement agronomique.

Structure et contenu des références et référentiels techniques en agronomie

Le choix des exemples de RTA et référentiels examinés ci-dessous répond à une double exigence de mise en œuvre effective à relativement grande échelle, et de diversité des domaines agronomiques concernés. Leur ordre de présentation correspond non seulement à une complexité croissante de la structure et du contenu des référentiels, mais aussi à un parcours progressif dans l'établissement d'un cadre d'analyse : à partir d'un ensemble de présomptions empiriques partagées par les auteurs, le premier exemple permet de formaliser des conjectures. Mises à l'épreuve et confortées par l'analyse des exemples suivants, ces conjectures deviennent un cadre d'analyse hypothétique, qui peut être appliqué à un ensemble de cas beaucoup plus large.

Premier exemple : les conseils de densité de semis pour la culture de tournesol

Le tableau 1 présente un référentiel récent, particulièrement concis puisqu'il ne contient que huit références élémentaires, qui sont les valeurs de densité de semis recommandées en fonction de la situation où a lieu le semis : d'une part, le degré de contrainte hydrique prévisible (colonne 1) et l'objectif de densité de levée correspondant (colonne 2), d'autre part les conditions de germination-levée plus ou moins favorables (colonnes 3 & 4).

Tableau 1 : Conseil de densité de semis pour la culture du tournesol (Debaeke et al, 2020)

Codes couleurs des surlignages : modalité technique de l'action ; contexte ; résultat recherché

Degré de contrainte Hydrique (1)	Objectif de densité de levée (2)	Cas général (3)	Conditions optimales (4)
		Taux de levée indicatif	
		75 %	85 %
Conditions très contraignantes en eau (sols superficiels et sols intermédiaires en région méditerranéenne)	50 000 plantes/ha	65 000 graines/ha	60 000 graines/ha
Conditions moyennement contraintes en eau	55 000 plantes/ha	70 000 graines/ha	65 000 graines/ha

⁹ Cf https://www.siv.archives-nationales.culture.gouv.fr/siv/IR/Fran_IR_028828

¹⁰ C'est notamment le cas de *Perspectives agricoles*, où la part des articles consacrés à la présentation de RTA est de l'ordre d'1/4 du volume total dans les numéros les plus récents.

(sols intermédiaires hors région méditerranéenne, tournesol irrigué en sol superficiel)			
Conditions faiblement contraintes en eau (sols profonds, tournesol irrigué en sol intermédiaire ou profond) Et zones fraîches et/ou à fin de cycle humide	60 000 plantes/ha si écartement entre rangs < 60 cm	75 000 à 80 000 graines/ha si écartement entre rangs < 60 cm	70 000 graines/ha si écartement entre rangs < 60 cm
	50 000 à 55 000 plantes/ha si écartement large	65 000 à 70 000 graines/ha si écartement large	60 000 graines/ha si écartement large

On y repère trois séries d'éléments, surlignés respectivement en vert, jaune et bleu, ayant trait (i) à la ou les modalité(s) technique(s) de l'action concernée (ici la densité de semis); (ii) au contexte écologique et socio-économique dans lequel cette ou ces modalité(s) est ou sont mise(s) en œuvre (contrainte hydrique et conditions de levée); (iii) au(x) résultat(s) obtenus ou recherchés, suite à la mise en œuvre de cette ou ces modalité(s): ici les densités de levée escomptées, qui découlent plus ou moins directement des rendements visés. L'ordre de lecture logique du tableau consiste à y « entrer » par le contexte, et à en « sortir » par les modalités techniques recommandées (densités de semis); les résultats visés (densités de peuplement et rendements) étant des données intermédiaires utilisées dans les calculs qui aboutissent aux densités de semis recommandées.

Dans son apparente simplicité, ce tableau est en fait l'expression d'une relation complexe entre rendement et densité de semis, modulée par les conditions d'implantation de la culture ainsi que par l'intensité et la durée du déficit hydrique subi au cours du cycle cultural. Il a été obtenu à l'issue d'une démarche de grande ampleur (Casadebaig et al, 2016), combinant l'analyse de données réelles issues de 38 expérimentations menées par l'institut technique Terres Inovia, et l'analyse de données virtuelles issues de simulations avec le modèle de culture SUNFLO (Pinochet et al, 2020).

Deuxième exemple : systèmes de culture et conservation des sols aux USA

Il s'agit dans ce cas d'un exemple historique de notoriété internationale, qui est l'un des référentiels associés à la célèbre « équation universelle des pertes en terre »¹¹ (Smith & Wischmeier, 1962; Wischmeier & Smith, 1965). Cette équation et les référentiels associés résultent de l'important effort de recherche fondamentale et appliquée entrepris aux USA à la suite des graves crises érosives apparues à partir de la fin des années 1920. Au cours de ces travaux, il est apparu que les systèmes de culture pratiqués engendraient, toutes choses égales par ailleurs, une considérable variabilité des pertes en terre, et pouvaient constituer selon les cas soit un facteur d'aggravation des risques, soit un levier de protection, avec dans les deux cas un très fort impact. D'où l'investissement consacré au développement d'un référentiel dédié au « facteur C » (*crop management*), dont le tableau 2 présente un extrait.

Ce référentiel vise à évaluer le niveau de risque d'érosion auquel expose une succession de cultures déterminée. La donnée fournie est le rapport des pertes en terre entre la culture pratiquée et une jachère nue continue, en fonction de la séquence de cultures précédente, du mode de gestion des résidus de récolte, des niveaux de productivité et de la phase du cycle cultural.

¹¹ En anglais *Universal Soil Loss Equation*, USLE. Elle permet de prédire la perte en terre annuelle d'une parcelle rectangulaire homogène :

A = RKLSCP, avec :

A : perte en terre annuelle en T/unité de surface

R : érosivité des pluies

K : érodibilité du sol (T/unité de surface/unité d'index R)

L : facteur « longueur de pente »

S : facteur « inclinaison de la pente »

C : facteur « système de culture » (*cropping management factor*)

P : facteur « parcellaire » (ou « aménagements antiérosifs ») : travail en courbes de niveau, terrasses, bandes enherbées antiérosives.

Nous y retrouvons les trois éléments mentionnés à propos de l'exemple précédent, mais sous une forme et selon une disposition différente. Le *choix technique concerné* porte sur la succession culturale et le type de gestion des résidus de récolte. Le *contexte* est peu présent dans le tableau lui-même (il n'y apparaît que via la distinction entre différents niveaux de productivité des cultures), mais il est en revanche très finement caractérisé par les facteurs de l'équation autres que le facteur C. Quant au *résultat escompté* (ou *performance*), il est relatif non plus à la production végétale mais au risque d'érosion. Enfin, la RTA fournie à l'utilisateur n'est pas une recommandation mais une évaluation comparative des performances obtenues selon diverses options. En corollaire, le référentiel complet est beaucoup plus volumineux que dans le cas précédent. D'une part, les pertes en terre sont fournies non pas sous forme d'une donnée unique pour chaque couple culture-succession de culture, mais en distinguant cinq étapes du cycle cultural (les cinq colonnes de droite du tableau 2). D'autre part, les modalités techniques à considérer (c'est-à-dire les lignes du tableau) sont potentiellement très nombreuses puisqu'elles correspondent théoriquement à l'ensemble des couples culture-succession de culture présents dans l'aire d'application du référentiel¹².

Tableau 2 : Rapport des pertes en terre (facteur C) entre un couvert végétal et une jachère nue continue, en fonction de la séquence de cultures précédente, du mode de gestion des résidus de récolte, des niveaux de productivité et de la phase du cycle cultural (Repris de Smith et Wischmeier, 1962)

Codes couleurs des surlignages : cf. tableau 1			Facteur C (%)				
			Niveaux de productivité (b)		Phases du cycle cultural (c)		
Couvert végétal, succession des cultures et gestion des résidus de récolte (a)	Prairie	Maïs	Interculture précédente	1	2	3	4
	Maïs répété 3 ans ou plus, résidus enfouis	Sans objet	F	36	63	50	26
Maïs répété 3 ans ou plus, résidus enlevés	Sans objet	M	80	85	60	30	70
Coton (1 ^{ère} année) sur prairie, résidus enfouis	M	M	15	34	45	35	30
Coton (2 ^{ème} année) sur prairie, résidus enfouis	M	M	35	65	68	46	42
Prairie permanente mixte (graminées-légumineuses)	M	f	Sans objet	0	0	0	0
...							

(a) Dans une version un peu plus tardive (Wischmeier et Smith, 1965), le référentiel complet comporte 128 combinaisons succession-gestion des résidus - type de travail du sol (non illustré ici) - niveau de productivité.

(b) F : élevé ; M : moyen ; f : faible

(c) 1 : 1^{er} mois après semis ; 2 : 2^{ème} mois après semis ; 3 : de la fin de 2 à la récolte ; 4 : Interculture suivante

Comme dans le cas précédent, le référentiel est sous-tendu par un important background de connaissances, concernant ici les processus de détachement et transport des particules terreuses. La couverture du sol par la culture et/ou les résidus de récolte y ont un rôle déterminant, à travers

¹² Dans la version publiée en 1965, il comportait 128 lignes. Pour les situations non recensées, des procédures d'appariement aux cas documentés étaient proposées.

l'interception des gouttes de pluie et le ralentissement du ruissellement. Les données telles que celles figurant dans le tableau 2 sont obtenues de façon empirique à partir d'un vaste réseau expérimental pluriannuel et multilocal¹³. Pour autant, la relation système de culture-perte en terre que traduit ce tableau n'est pas de type « boîte noire », dès lors que les résultats expérimentaux sont obtenus, interprétés et validés sur la base d'un modèle explicatif global, dont l'« équation universelle » est un résumé synthétique.

Troisième exemple : la fertilisation azotée du maïs en Alsace

La mise en évidence de l'augmentation des teneurs en nitrates des eaux souterraines en Alsace, dans la seconde moitié des années 1970, a conduit à remettre en cause les principes de prescription en vigueur jusque dans les années 80¹⁴, et à leur substituer une adaptation régionale de la méthode du bilan prévisionnel (Collectif, 2015). On considère alors que l'azote à apporter par les engrais minéraux n'est qu'un complément de l'offre d'azote assurée par le sol et les apports organiques, qu'il faut pouvoir estimer pour mettre en œuvre l'équation du bilan permettant le calcul d'une dose recommandée.

Dans ce cas, on a donc affaire non plus à un référentiel unique, mais à une « grappe » de référentiels, correspondant aux différentes sources d'azote autres que l'engrais, agrégés autour de l'équation (figure 1). Dans chacun de ces référentiels on retrouve les 3 éléments constitutifs déjà repérés : *modalités techniques* (précédent, culture intermédiaire, apports organiques, etc.), *données de contexte* (type de sol principalement, mais aussi de façon implicite climat régional), *performances escomptées* (quantités d'azote minéral fournies à la culture, et permettant des économies d'engrais, ou rendement-objectif dont découlent les besoins totaux). Selon les cas, les « entrées » des tableaux (choix des lignes ou colonnes) se font par l'un ou l'autre de ces éléments ; en revanche les « sorties » (données fournies dans les cases des tableaux) correspondent toujours à des *performances*, en l'occurrence à des fournitures d'azote minéral.

Le socle de connaissances sur lequel repose cette grappe de référentiels correspond à l'« état de l'art » sur le cycle de l'azote, tel qu'il était formulé au plus fort de la diffusion de la méthode du bilan prévisionnel (COMIFER, 1996). Tout en donnant une base explicative générale¹⁵ au raisonnement de la fertilisation, cet état de l'art devait être complété par l'acquisition de références locales pour préciser les valeurs des différents termes du bilan. Dans le cas de l'Alsace, cette démarche a été initiée à partir de la fin des années 80 par la mise en place d'essais doses d'azote et de témoins non fertilisés, et poursuivie à partir de 1990 dans le cadre des opérations locales Ferti-Mieux¹⁶ avec la constitution d'un réseau d'enquête élargi et structuré. On peut donc dire que, par rapport aux deux cas précédents, ce troisième exemple illustre une autre combinaison de démarches pour élaborer les références : la combinaison enquête-expérimentation

¹³ En 1965 il comportait 47 sites répartis dans 24 États et avait fourni plus de 10000 enregistrements de pertes en terre (combinaisons année-parcelle). Par la suite ces enregistrements ont été démultipliés, entre autres grâce à l'utilisation de simulateurs de pluie, et n'ont jamais cessé d'être complétés.

¹⁴ Dans les années 1980, la recommandation de la quantité d'engrais à apporter au maïs était de 2 unités par quintal de rendement espéré. Dans le même temps certains organismes de développement régionaux encadraient des « clubs 150 quintaux » pour cette culture.

¹⁵ Aujourd'hui considérée comme très imparfaite en raison du caractère sommaire de l'estimation des « besoins de la culture », cette assise explicative représentait à l'époque une véritable rupture par rapport à l'approche « boîte noire » basée sur les essais « courbes de réponse ».

¹⁶ Présentation complète de cette opération, cf <https://www.academie-agriculture.fr/actualites/academie/seance/academie/operation-ferti-mieux>

Figure 1 : référentiel pour le calcul de la dose d'engrais minéral à apporter au maïs en plaine d'Alsace

Département	Type de sols	Niveau de rendement (q/ha) Non irrigué	Niveau de rendement (q/ha) Irrigué
67	Limon sain et loess favorable	120	
67	Limon sain Outre-Forêt et arrière Kochersberg	115	
67	Limon battant	110	
67	Sableux des rivières vosgiennes Nord	92	110
67	Argileux des rivières vosgiennes Nord (conditions normales)	107	
67	Sableux à limono sableux des rivières vosgiennes Centre	92	117
67	Argileux et bruch des rivières vosgiennes Centre (conditions normales)	117	
67	Limono sablo argileux à limono argileux des rivières vosgiennes Centre	102	117
67	Ried brun caillouteux		127
67	Ried gris Nord	100	120
67	Ried argileux bande rhénane Nord	100	
67	Ried gris, ried noir, ried rhéna Sud	110	
67	Limono sableux et sableux du Rhin	107	127
68	Ried brun		127
68	Ried gris	117	
68	Ried noir	117	
68	Profond des sables du Rhin et de la Hardt		127
68	Superficiel de la Hardt		127
68	Plaine de l'Ill	107	122
68	Ochsenfeld	92	117
68	Piémont	107	
68	Sundgau limon acide et battant	97	
68	Bas Sundgau limon calcaire sain	112	

PRO	Variante	Culture pour laquelle le PRO est apportée	Période d'apport	Coefficient d'équivalence engrais	Teneur en N du PRO	N efficace uN/ha
Fumier de Bovin 40 T/ha	pailleux litière accumulée	de printemps	printemps	0,20	5,4	43
		de printemps	été devant CIPAN / automne	0,10	5,4	22
		d'automne	automne	0,10	5,4	22
Lisier de Bovin 30 m³/ha	Incorporation dans les 24h	de printemps	printemps	0,30	2,9	26
		d'automne	fin été	0,20	2,9	17
		d'automne	printemps	0,30	2,9	26
Lisier de Porc 30 m³/ha	Incorporation immédiate	de printemps	printemps	0,70	3,9	82
		de printemps	été devant CIPAN	0,05	3,9	6
		de printemps	printemps	0,50	3,9	59
Fumier de volaille = Fientes avec litière	Incorporation immédiate	de printemps	printemps	0,60	24,1	145
		d'automne	automne	0,10	24,1	24
		de printemps	printemps	0,50	24,1	121
				0,45	24,1	108

Fournitures en azote par type de déjection animale, dose, culture et date d'apport, effet direct

Fournitures en azote par type de déjection animale, dose et type de sol, arrière-effet

Tableau d'effet direct des valeurs régionales de coefficient d'équivalence engrais et de pourcentage d'azote du PRO (Σ PRO) estimé selon les moyennes régionales pour les PRO les plus courants

Table des 23 types de sol régionaux : niveaux de rendement en régime

Quantité épandue ↓ Type de sols	PRO			
	Fumier de Bovin	Lisier de Bovin	Lisier de porc	Fumier de volaille
Autres sols	40 T/ha	30 m³	30 m³	10 T/ha
Argile des rivières vosgiennes Nord Argile et bruch des rivières vosgiennes centre Argile bande rhénane Nord Sundgau	35	15	10	10
Valeur arrière effet uN/ha	20	10	5	5

Pour le niveau de rendement, n'utiliser ces références qu'en cas d'absence de références propres à l'exploitation.

b = 2,3 kgN/quintal

Equation de la fertilisation azotée selon la méthode du bilan prévisionnel :

Dose d'azote à apporter		=		Besoins (B) - Fournitures (F)	
Niveau de rendement	q/ha	Fourniture du sol (RSH + Mh)		kgN/ha	
Coefficient	kgN/q	Contribution des fertilisants organiques		kgN/ha	
Azote non disponible	kgN/ha	Effet précédent		kgN/ha	
Besoins Totaux = B				Fournitures totales = F	

Département	Type de sols	Azote non disponible (kg N/ha)	Fourniture du sol (kg N/ha)
67	Limon sain et loess favorable	25	130
67	Limon sain Outre-Forêt et arrière Kochersberg	25	100
67	Limon battant	25	80
67	Sableux des rivières vosgiennes Nord	10	60
67	Argileux des rivières vosgiennes Nord (conditions normales)	20	80
67	Sableux à limono sableux des rivières vosgiennes Centre	10	90

Table des 23 types de sol régionaux : fourniture en azote et azote non disponible (extrait)

Eventuel supplément de fourniture en azote selon le précédent

	Pomme de Terre	Chou	Soja Acquisition en cours de référence	Tabac	CIPAN sans légumineuses	CIPAN avec légumineuses
Effet précédent (kg N/ha)	40	40	30	40	15	30

Quatrième exemple : le chaulage en Bresse

Dans cette région caractérisée par une prédominance de limons battants hydromorphes, la valorisation de l'investissement très coûteux que constitue le drainage est apparue variable selon le degré d'acidification des sols. Ce constat a conduit la chambre d'agriculture de Saône et Loire à entreprendre une démarche de diagnostic sur les interactions entre chaulage, drainage et travail du sol (Fabre et Kockmann, 1987). Cette démarche débouche sur un schéma de préconisation du chaulage (Kockmann, 1990) qui, comme dans le cas précédent, met en œuvre une grappe de référentiels (figure 2). On y retrouve là encore les constituants déjà repérés dans le contenu des RTA précédentes : les *modalités techniques* concernent les doses et formes des apports d'amendement préconisées, ainsi que leur échelonnement dans le temps ; le *contexte* se réfère aux caractéristiques du sol et du climat influant sur le ressuyage et le degré d'hydromorphie qui en résulte ; les *performances* sont relatives aux différentes composantes de la fertilité - physique, chimique et biologique-, caractérisées dans chaque cas par des comportements du sol appropriés. Cet exemple se distingue par un effort de décomposition de la chaîne particulièrement complexe de processus par lesquels s'exercent les effets bénéfiques plus ou moins sensibles du chaulage, en évitant de recourir à un raccourci « chaulage-rendement ». En lien avec ce parti-pris on note :

- Une caractérisation pluridimensionnelle des éléments constitutifs de la RTA : évaluation multicritère des effets escomptés sur la fertilité du milieu, prise en compte des différents aspects de l'action technique exercée ; prise en compte des différents aspects du contexte influant sur le degré d'hydromorphie (climat et sol) ;
- La mise en œuvre de modèles de connaissance différents selon les branches du référentiel correspondant aux trois types de fertilité. En découle le caractère polymorphe, tantôt quantitatif, tantôt qualitatif, mais toujours explicite¹⁷, des relations établies entre ces trois types de constituants ;
- La pluralité des démarches d'élaboration des différents référentiels, avec en particulier un recours intensif aux enquêtes de terrain pour documenter le volet « fertilité physique » (Fournet et Ortscheit, 1985) ;
- La combinaison de référentiels issus de démarches de niveaux différents (national et régional) pour établir un système de préconisation complet et adapté au contexte local. Il est d'ailleurs à noter que le niveau national seul n'aurait pas permis de documenter avec la précision requise la composante « performances » du référentiel.

¹⁷ Autant que le permettait l'état des connaissances à l'époque, avec un décalage évident concernant la « fertilité biologique » (Kockmann et al., 1990).

Figure 2 : référentiel de préconisation du chaulage en Bresse

pH eau	CaO en %	Ecart entre pH eau et pH KCl	Conseils R / redressement Cf Tableau n°4 E/ entretien Cf Tableaux n°2 et 3
<5,5	*	*	R rapide de 1 unité de pH ; contrôle ensuite
5,5 à 6,2	*	*	R rapide de Delta pH puis E.
6,2 à 6,7	<1,9	>0,6	R rapide de Delta pH puis E
	*	>0,6	R de Delta pH et E
6,7 à 7,2	*	<0,6	E
	<1,9	>0,6	R de Delta pH et E
	<1,9	*	E
	1,9 à 2,6	>0,6	E urgent
>7,2	1,9 à 2,6	<0,6	E
	>2,6	*	E différé
>7,2	*	*	Etat calcique satisfaisant, à surveiller

Légende : Une * signifie « indifférent » ; Delta pH = pH 6,9-pH réel

Tableau n° 1 Diagnostic des besoins en chaulage en limons battants de Bresse

Si décision de redressement

Année	Forme du produit	Si pH eau initial 5,7	Si pH eau
1	Calcaire pulvérulent	2,5 t	2,5 t
2		2,0 t	2,5 t
3	Calcaire broyé ou pulvérulent	2,0 t	2,5 t
4		2,0 t	2,5 t
5	Contrôle par analyse	pH eau final ?	pH eau fin

Tableau n° 4 : Exemples de redressement fractionné en limon battant initialement très acide

Commenté [FK1]: La lisibilité de la figure paraît limitée par comparaison avec le schéma envoyé en juillet remis en PJ. Mais peut-on faire mieux ?

Commenté [RK2R1]: Voir mon précédent commentaire concernant la figure 1 et les modes de collage. Je renvoie quand même la figure en pdf et en ppt pour permettre à la revue de traiter au mieux la lisibilité.

Commenté [j3]: Le plus grave serait que les tableaux du bas (ou de droite si la page est « redressée) soient tronqués : ça donnerait un aspect bricolo et amateur très regrettable

Commenté [RK4R3]: En l'état actuel du fichier, la figure qui s'affiche est complète. Et elle empiète sur le bas de page puisque le numéro de page est caché.

Si d'entretien décision

Fonctionnement Hydrique Du sol	Exportation et Effet Acidifiant lié A l'azote	Lessivage Moyen	U Cao/ha Par an	U Cao /ha Sur 4 ans
Drainé ou peu Hydromorphe	250	200 à 300	450 à 550	1800 à 2200
Hydromorphe à Très hydromorphe	200	50 à 175	250 à 375	1000 à 1500

Tableau n° 2 : Chiffrer l'Entretien : les ordres de grandeur des principaux postes

Dose globale d'entretien en unités CaO /ha sur 4-5 ans	Drainé 1800 à 2200	Hydromorphe 1000 à 1500
1-Apport annuel régulier a- Scories Thomas (40) b- Calcaire pulvérulent (50) voir Chaux	1,1 à 2,2 t 0,9 à 1, t	0,6 à 1,5 t 0,5 à 0,75 t
2-Chaulage périodique a- Tous les 2 ans, alors Calcaire pulvérulent ou broyé (50) b- Tous les 4 ans, alors calcaire broyé à action lente (50)	1,8 à 2,2 t 3,6 à 4,5 t	1 à 1,5 t 2 à 3t

Légende : les tonnages correspondent aux produits commerciaux (valeur neutralisante indiquée entre parenthèses)

Tableau n° 3 : Exemples de stratégies pour assurer l'Entretien.

Terrains	Drainé ou faiblement hydromorphe	Drainé ou faiblement hydromorphe	Hydromorphe A très hydromorphe	Hydromorphe A très hydromorphe
Profil au semis	Dégradé	Non dégradé	Dégradé	Non dégradé
Pluviosité Hiver-Printemps forte	Nul	Fort	Nul	Nul
Pluviosité Hiver-Printemps faible	Nul	Faible à nul	Nul	Faible à fort

Tableau b : Effet du chaulage sur la réduction de la reprise en masse

Effets attendus du chaulage sur

...la fertilité physique

Pluviosité en Automne (ou Printemps)	Faible	Fort
En terrain drainé	Nul	Faible à nul
En terrain hydromorphe	Faible à fort	Fort

Tableau a : Effet du chaulage sur l'amélioration de la praticabilité du terrain

Observations de l'enracinement	Gain en colonisation racinaire (sauf si profil cultural dégradé)
Horizon labouré	+ 10 à + 20 %
Proche horizon pédologique	+ 30 % voir davantage

Tableau f : répercussions du chaulage sur la colonisation racinaire

...la fertilité chimique

Seuils du pH eau	Majorer	Majorer le redressement
Inférieur à 6,0	+60 unités	+ 70%
Compris entre 6,0 et 6,5	+ 30 unités	+50%
Supérieur à 6,5	+ 0 unité	+ 30%

Tableau d : effets du chaulage sur l'assimilabilité et les apports de P (A noter qu'en cas de sur-chaulage, la disponibilité du phosphore régresse)

Supérieur à 7,0	Réduction de la solubilité du cuivre, zinc, fer, bore, manganèse et augmentation de l'assimilabilité pour magnésium, molybdène.
-----------------	---

Tableau e : Assimilabilité de certains éléments nutritifs en fonction du pH du sol.

...la fertilité biologique

Seuils du pH eau	Répercussions sur la fertilité biologique du sol
• pH <5	Les bactéries nitrifiantes sont inhibées donc risque relatif à la minéralisation
• pH compris entre 5 et 6,9	Effet bénéfique sur la vie biologique du sol : amélioration de la dynamique d'évolution de la matière organique par activation de la minéralisation et par accroissement de la densité des vers de terre sans altération du stock d'humus stable
• pH > ou = à 7	Les effets bénéfiques ne sont pas extrapolables aux situations en sur-chaulage intensif, notamment si les taux de matière organique sont faibles.

Tableau c : effets du chaulage sur la fertilité biologique du sol

Structure et contenu des références et référentiels techniques en agronomie : proposition d'un cadre d'analyse

Au-delà de finalités et présentations très différentes, les quatre exemples décrits ci-dessus répondent de façon convergente aux principes suivants :

- Une RTA n'est pas une donnée naturellement préexistante et qu'il suffit de « collecter » ou « acquérir ». C'est l'expression de la relation établie entre trois éléments constitutifs, ayant trait respectivement aux modalités de l'action engagée, au contexte dans lequel elle a lieu, et aux performances escomptées suite à sa mise en œuvre. Cette expression correspond à l'application de la relation en question à une situation particulière, et aux valeurs que prennent chacun des trois éléments constitutifs dans cette situation.
- La relation tripolaire repose elle-même sur un *modèle de connaissance agronomique* (MDCA) propre à chaque cas, c'est-à-dire sur une représentation plus ou moins explicative et détaillée du fonctionnement de l'agroécosystème et de sa réponse aux actions techniques concernées. Cette représentation se rapproche de la notion de *modèle de connaissance* de l'ingénierie cognitive (Paquette, 2002).
- Les modalités d'élaboration des référentiels dépendent du caractère plus ou moins explicatif et formalisé des modèles de connaissance sous-jacents. Elles font appel aux différents types de méthodes d'acquisition et de traitement des données agronomiques. La dimension et la complexité apparentes du référentiel mis à disposition des utilisateurs ne reflètent pas l'importance de l'investissement requis : des référentiels en apparence simples et succincts peuvent résulter de combinaisons de démarches très sophistiquées, et d'un effort considérable d'acquisition de données.

Le cadre d'analyse hypothétique que forment ces principes a été mis à l'épreuve en l'appliquant à une collection d'exemples beaucoup plus large du point de vue thématique (cf. annexe), et comprenant des référentiels de création plus récente, explicitement liés aux transitions agroécologique et énergétique. Cet examen confirme que la structure tripolaire des RTA et leur lien avec un MDCA sous-jacent s'appliquent à chacun des 61 nouveaux cas étudiés, tout en prenant une très grande diversité de formes selon les problématiques concernées, et selon les démarches d'élaboration des référentiels. Bien que partielle, puisque l'élargissement de l'éventail d'exemples reste borné et orienté par l'expérience professionnelle des auteurs, cette approche aboutit à une première « validation par l'usage » du cadre d'analyse proposé.

Renouveler les références et référentiels : comment s'y prendre ?

L'« équipement » de l'agriculture française en RTA et référentiels lui permet-il d'affronter les transitions en cours et à venir ? Au contraire, est-il un facteur du « verrouillage » de l'innovation (Meynard et Messéan, 2014) ? Quelles sont les évolutions nécessaires pour affronter les transitions ? Compte tenu de l'ampleur du sujet, qui tient non seulement à la multiplicité des transitions concernant l'agriculture, mais aussi à la radicalité des changements que certaines d'entre elles impliquent¹⁸, il convient d'emblée de restreindre la portée du propos à une réflexion préliminaire, visant à susciter et préparer la vaste réflexion prospective nécessaire pour répondre à ces questions. Sans aucune prétention à l'exhaustivité, on se bornera donc à considérer trois aspects à prendre en compte dans cette réflexion : le caractère à la fois contradictoire et dynamique du lien entre transition et référence, l'effet stimulant que peut avoir un état des lieux s'il est bien orienté, et la dimension collective, voire sociale, que revêt le processus de référencement.

¹⁸ Cf AE&S n°12.2, déjà cité

La dialectique transition-référencement et ses différentes traductions

Si on s'en tient à la terminologie, il y a de prime abord une certaine antinomie entre transition et références. Dans son acception la plus radicale, la transition débute par une phase initiale d'exploration, ce qui veut dire en l'absence de références. Inversement, les références ne peuvent émerger qu'à partir d'un certain degré de stabilisation des pratiques, autrement dit, à la limite, à partir du moment où la transition n'a plus cours. Bien entendu, l'évolution technique agricole n'est pas aussi saccadée. Dès le début des transitions, émergent des formes embryonnaires de références, et dès lors que certaines transitions sont engagées à grande échelle, le travail de référencement se met en route. C'est d'ailleurs ce qu'illustre la collection d'exemples présentée en annexe : certains référentiels récents sont explicitement liés aux enjeux des transitions climatique, agroécologique et énergétique.

Tout en admettant que les innovations de rupture se font en l'absence, au moins partielle, de références préalables puisqu'elles correspondent à des leviers techniques non ou peu utilisés en situation conventionnelle, on doit aussi considérer que, s'il persiste, ce déficit peut à terme compromettre la consolidation des innovations et ralentir leur extension : par exemple la gestion de l'azote, cruciale en Agriculture (AB) car elle conditionne fortement les rendements obtenus, s'appuie sur la présence des légumineuses ou autres espèces fixatrices dans les successions de culture et/ou les prairies. Or les flux d'azote liés à la fixation symbiotique sont peu documentés en regard de l'extrême variabilité inhérente aux multiples facteurs dont elle dépend. Il en résulte une imprécision qui pénalise la mise en œuvre de l'AB, tout particulièrement en situation de conversion. Plus globalement, l'adoption d'une innovation non référencée implique pour l'agriculteur une prise de risque, qui peut être dissuasive même si l'innovation est pertinente dans son cas. Entre autres illustrations de l'obstacle ou du frein aux transitions, que peut constituer le déficit de références, un cas emblématique nous semble être l'agroforesterie : on observe un fort contraste entre son évocation très fréquente comme forme d'agriculture innovante répondant au défi de la transition agroécologique, et le faible niveau de documentation disponible, que ce soit pour choisir entre les innombrables modalités qu'elle peut prendre selon le contexte et les objectifs (Torquebiau, 2022), ou pour déterminer les itinéraires techniques adéquats. Ce décalage résulte certes de la place limitée accordée à l'agroforesterie dans les politiques publiques comme force d'appel à l'établissement de RTA, mais aussi d'un retard à l'établissement d'un cadre d'analyse agronomique permettant d'identifier les différentes rubriques à référencer¹⁹. Au total, il y a lieu de chercher à réduire le décalage temporel incontournable, qui s'instaure entre transition et référencement.

Les transitions entraînent un considérable élargissement des enjeux à assumer, et donc des thématiques à référencer. De surcroît, elles ont pour corollaire une modification plus ou moins forte de chacun des trois éléments constitutifs de la RTA : contexte (notamment climatique, et plus globalement écologique) dans lequel sont prises les décisions techniques ; critères et échelles d'évaluation des objectifs ou résultats ; modalités techniques à mettre en œuvre. De surcroît, les transitions, et tout particulièrement la transition agroécologique, qui implique un moindre recours aux intrants industriels, si ce n'est leur abandon, ont pour corollaire une montée en complexité des leviers et procédures de raisonnement technique, et par suite des références et référentiels associés. Un des aspects les plus notables de cette montée en complexité est le fait que les actions à référencer s'appliquent à des niveaux d'organisation et/ou à des échelles spatiales de plus en plus englobants. Ainsi la protection intégrée des cultures met en jeu l'ensemble du système de culture, et s'étend jusqu'à la gestion du paysage (Ricci et al, 2011). Au-delà de recommandations très globales sur la diversité des espèces dans les successions, ou à l'inverse de réussites remarquables mais ponctuelles (Deguine et al, 2016), on ne peut que constater le décalage qui existe entre les référentiels disponibles sur l'impact à moyen-long terme des stratégies phytosanitaires et l'emploi de ces leviers complexes, par rapport à ceux relatifs à l'usage de leviers « élémentaires » tels que choix variétal ou produits phytopharmaceutiques. Ce décalage ne se réduit pas à un problème de

¹⁹La création en 2014 du RMT Agroforesteries vise à fédérer des acteurs du système R&D pour promouvoir la production de RTA.

nombre ou d'accessibilité des référentiels, il est aussi lié aux différences de modalités d'utilisation et de contraintes qui en découlent : ainsi les référentiels visant à réduire de façon radicale l'usage des pesticides, élaborés dans le cadre des réseaux DEPHY du plan Ecophyto, ne sont pleinement valorisables que dans le cadre de travaux de groupe bien organisés. Ils se présentent en outre sous des formes beaucoup plus globales et moins schématiques que les référentiels « classiques » portant sur des interventions techniques élémentaires. Plus globalement, le référencement du levier agronomique multifonctionnel que constituent les systèmes de culture est un champ d'investissement prioritaire, y compris du point de vue méthodologique²⁰.

Quelles formes peut prendre le renouvellement plus ou moins poussé des RTA et référentiels, qu'impliquent les transitions agricoles ? On peut schématiquement distinguer plusieurs cas de figure, correspondant à des niveaux d'investissement plus ou moins importants, et surtout à des démarches d'élaboration différentes²¹ :

- *Adéquation en l'état* : les référentiels existants permettent de prendre en charge les nouvelles situations induites par les transitions, ces dernières se traduisant pour l'utilisateur par de simples déplacements au sein du référentiel : par exemple, dans le tableau 1, la prise en compte de contraintes hydriques plus sévères amène l'utilisateur à se situer sur une ligne plus élevée du tableau.
- *Adaptation modérée (ou re-paramétrage)* : la structure du référentiel n'a pas à être modifiée - en d'autres termes, le modèle de connaissance sous-jacent reste valide -, mais il faut réactualiser les valeurs fournies dans le référentiel (par exemple, dans le cas de la fertilisation azotée du maïs, réévaluer les minéralisations compte tenu du changement climatique), voire référencer de nouvelles modalités (dans ce même exemple, introduire les résidus de méthanisation, et plus classiquement, référencer une variété nouvellement inscrite). Bien que ne portant pas sur les fondements de la RTA et du référentiel, ce re-paramétrage peut être laborieux et coûteux, par exemple s'il faut réitérer plusieurs années les acquisitions de données nécessaires.
- *Révision structurelle* : sur un thème donné – qui préexiste et pour lequel les actions techniques gardent la même définition, avec les mêmes critères d'évaluation - la situation nouvelle, et/ou les avancées dans la connaissance, disqualifient en tout ou partie le modèle de connaissance sous-jacent. Un nouveau modèle de connaissance est, à terme plus ou moins proche, substituable à l'ancien. À la suite de cette substitution, le référentiel est à reconstruire plus ou moins complètement, avec là encore un investissement nécessaire qui peut être important. Cela a été le cas dans le passé suite à la remise en question des principes de fertilisation raisonnée pour P et K, donnant désormais un rôle prioritaire à l'espèce végétale et à sa sensibilité aux carences minérales, alors que la richesse du sol était jusque-là prépondérante (Gachon, 1988). De nos jours, ce cas de figure pourrait correspondre à la remise en cause du bilan prévisionnel comme fondement prescriptif de la fertilisation azotée des cultures, au profit d'un suivi de la nutrition azotée (Soenen et al, 2017). Dans un futur proche, il pourrait aussi correspondre à une nouvelle approche de l'évaluation des jours disponibles pour les travaux des champs (Sillon, 1999), fondée sur une modélisation mécaniste de l'évolution du profil hydrique (Chanzy et Bruckler, 1993) et des propriétés mécaniques du sol en fonction du climat (Keller et al, 2007) ; ou encore à l'élaboration de référentiels sur les rendements-objectifs à partir du modèle de culture STICS (Brisson et al, 1998 ; Brisson et Levraut, 2010), plutôt que sur la transposition de rendements constatés par enquête plus ou moins sommaire.

²⁰ Ce champ d'étude est l'objet du RMT « Systèmes de culture innovants », renommé récemment « Champs et Territoires ». À titre d'illustration cf. Reau et al, 2016.

²¹ En particulier quant aux implications respectives de la recherche et du développement, et à leur coopération.

- *Création d'un nouveau référentiel*, dans un domaine technique et sur un sujet proche de ceux déjà référencés : par exemple gestion d'un nouveau bioagresseur, ou d'un bioagresseur connu selon une stratégie alternative (typiquement désherbage mécanique au lieu du désherbage chimique), prise en compte de nouveaux critères d'évaluation variétale... La condition initiale est qu'un nouveau modèle de connaissance ait été formalisé, mettant en relation action, contexte et performances. Sur cette base, la structure du référentiel est à concevoir *de novo*, et les différentes catégories de variables susmentionnées doivent faire l'objet d'un travail de définition et caractérisation lui aussi inédit. Cependant, la démarche n'est pas totalement exploratoire car certaines des variables d'« entrée » et/ou de « sortie » du MDCA sont héritables de référentiels préexistants : ainsi l'évaluation variétale multicritère reste axée sur une notion de variété inchangée, et n'implique pas nécessairement de recréer une nouvelle typologie des contextes d'évaluation ; de même certains traits de caractérisation des adventices restent pertinents pour raisonner les désherbages mécanique aussi bien que chimique.
- *Invention d'un référentiel*, sur un sujet inédit, tel qu'ont pu l'être dans les dernières décennies, la maîtrise des émissions de GES et/ou la gestion de la qualité de l'air à l'échelle dite « territoriale », ou encore la réduction drastique de l'usage des pesticides chimiques impliquant une reconception des systèmes de culture, et par suite une réorientation plus ou moins poussée des systèmes de production. Dans un futur proche, ce pourrait être le cas d'une gestion de la fertilité biologique du sol reposant sur les récentes avancées de l'écologie du sol (Lemanceau et al, 2009). Comme précédemment, la condition nécessaire est que le MDCA support ait été mis en forme, mais dans ce cas de figure le travail de recherche nécessaire est encore en cours, et cet objectif de formalisation n'est le plus souvent pas encore atteint, ou ne l'a été que tout récemment. Selon l'état des connaissances, un éventail plus ou moins large de stratégies d'élaboration des RTA et référentiels peut se présenter, avec un équilibre variable dans la combinaison entre démarches empiriques et modélisation explicative du fonctionnement des agroécosystèmes. Les exemples cités ci-dessus illustrent à cet égard des options contrastées : utilisation intensive de modèles numériques à fondement mécaniste pour évaluer les « empreintes carbone » territoriales, alors que pour la réduction d'usage des pesticides, la complexité du sujet amène à recourir à une démarche empirique-holistique : enquêtes sur des réseaux d'exploitations-tests et expérimentations-système dans le cadre des réseaux DEPHY. Le cas de la biologie des sols pourrait constituer un cas d'école puisque beaucoup reste à faire en matière de références et référentiels dans ce domaine (Chaussod et Nouaïm, 2019).

Examiner le présent pour préparer l'avenir

Dès lors qu'il y a un besoin de renouvellement important de la vaste panoplie de référentiels ayant cours aujourd'hui dans l'agriculture française -sans doute plusieurs centaines si ce n'est plus -, et que ce renouvellement n'est pas une réinitialisation totale et synchronisée, la nécessité d'établir un état des lieux global et de l'actualiser régulièrement semble évidente. Sa mise en pratique à l'échelle nationale l'est beaucoup moins, en raison de la parcellisation du système de recherche-développement agronomique français, tout particulièrement au niveau des organismes les plus actifs dans l'élaboration des RTA et référentiels correspondants (Kockmann et Pouzet, 2022). A minima, et même si elle reste répartie entre différents acteurs, cette mise en œuvre doit s'appuyer sur une réflexion transversale, dont la première étape consiste à identifier les critères de caractérisation des référentiels, qui seraient pertinents vis-à-vis des problématiques de transition. *La couverture du domaine technique à référencer s'impose d'emblée comme premier critère d'examen* : l'état des lieux des RTA et référentiels doit s'appuyer sur une grille d'inventaire

permettant de révéler des lacunes ou déséquilibres qui à défaut risqueraient d'être ignorés. Cette grille doit inclure (et idéalement permettre de croiser) les différents types de décisions techniques, de filières et productions végétales, d'enjeux ou finalités (production, économie de l'exploitation et des filières, fertilité du milieu, environnement sous ses multiples facettes²², alimentation-santé, etc.), et de niveaux d'organisation auxquels correspondent les décisions et actions techniques. En situation de transition, l'inventaire est obligatoirement incomplet et constamment à renouveler, puisque les problèmes à traiter apparaissent de façon plus ou moins prévisible (introduction de nouvelles cultures dans une région donnée, gestion de bioagresseurs émergents, innovations incrémentales ou de rupture...), notamment en relation avec de nouvelles fonctions à assurer (par exemple limitation des émissions de gaz à effet de serre, stockage du carbone, production d'énergies renouvelables...). Avant que ces fonctions et problèmes ne soient identifiés, les thèmes techniques correspondants sont par définition absents de la grille d'inventaire des référentiels disponibles à un moment donné. Cette grille doit donc faire l'objet d'une veille et d'une actualisation permanentes. L'existence d'*outils d'aide à la décision* sur un thème donné, qui peuvent être très prometteurs vis-à-vis de tel ou tel type de transition, peut d'ailleurs masquer l'éventuelle absence de référentiels accessibles et transparents sur le même thème. La vigilance à cet égard nous semble particulièrement de mise concernant les niveaux d'organisation les plus complexes et étendus et actions techniques correspondantes (bassins hydrologiques, ou espaces de gestion des émissions de gaz à effet de serre)²³.

Une deuxième catégorie de critères d'examen concerne l'*opérationnalité* des RTA et référentiels, autrement dit l'efficacité qu'ils confèrent à la prise de décision et/ou à son accompagnement. Cette efficacité recouvre plusieurs aspects :

- La *pertinence technique*, c'est-à-dire le caractère plus ou moins explicite de la façon dont sont formulées les modalités techniques de l'action concernée : si cette formulation est évasive ou indirecte, l'utilisateur ne saura pas « quoi faire », et renoncera à utiliser la RTA et le référentiel.
- L'*ergonomie*, qui recoupe en partie mais pas totalement le critère précédent : au-delà des aspects évidents – et pourtant sujets à très forte variabilité – que sont l'*accessibilité* et la *lisibilité* des référentiels, ce caractère met en jeu la compatibilité entre le mode de raisonnement mis en œuvre par l'utilisateur dans sa prise de décision, et le raisonnement implicite qui sous-tend la référence et son utilisation théorique. À cet égard, l'existence et les modalités d'exercice d'un accompagnement technique sont déterminantes : l'ergonomie de RTA et référentiels portant sur des niveaux d'organisation complexes ne peut être appréciée sans savoir dans quel cadre et avec quel appui ils seront employés.
- La *fiabilité*, autrement dit la reproductibilité, chez l'agriculteur utilisateur de la RTA, de la relation contexte-pratique mise en œuvre- résultat « prédite » par le référentiel.
- La *précision*, qui concerne elle-même deux aspects : le premier relatif aux modalités techniques de l'action concernée, le deuxième à la caractérisation du contexte et à l'adéquation de la RTA à la situation de l'utilisateur. Dans chaque cas, la précision optimale ne correspond pas nécessairement au degré de résolution le plus fin : ainsi dans le tout premier exemple évoqué dans cet article (tableau 1), les classes de densités de semis et la typologie des contextes peuvent sembler grossières dans l'absolu ; alors que dans la pratique des catégories plus fines auraient été au mieux superflues, voire inutilement génératrices de complication et perplexité pour l'utilisateur.

²² Avec une mention spéciale pour les interactions entre activité agricole et biodiversité, qui non seulement sont sous-documentées, mais resteront obligatoirement un domaine de référencement toujours à compléter et réactualiser.

²³ Au vu du relatif foisonnement des démarches d'aide à l'élaboration et à l'évaluation participatives de scénarios territoriaux, qui en restent au stade de la « preuve de concept » car faute de données nécessaires (i.e. de références et référentiels) elles ne peuvent être transposées ailleurs que dans le site expérimental initial.

Robustesse et portabilité constituent une troisième catégorie de critères, qui intéresse cette fois plus directement le concepteur que l'utilisateur de RTA. Ce sont deux propriétés distinctes, mais qui se rapportent toutes deux à la façon dont les références évoluent en réponse aux changements qui affectent la relation tripolaire contexte-modalité d'action-performance. La robustesse traduit de façon inverse la sensibilité des RTA à une variation d'un ou plusieurs de ses termes. Si cette sensibilité est forte, une approximation ou déviation dans la description de la situation (liée par exemple à une hétérogénéité intra-parcellaire) peut entraîner une inadéquation de la référence fournie à l'utilisateur, et une décision inappropriée. Cette instabilité peut correspondre à une imperfection du MDCA, par exemple si ce dernier décrit de façon imprécise certains effets de seuil, mais elle peut aussi résulter de la façon dont cette relation est mise en forme, et en particulier de la discrétisation en classes des variables d'« entrée » dans le référentiel. On voit dans les deux cas, que la robustesse est pour partie dépendante de la façon dont le référentiel est construit. Quant à la portabilité, elle correspond à la possibilité, et à la plus ou moins grande facilité d'adaptation d'un référentiel à des situations extérieures à son domaine d'établissement initial : si on se réfère aux cas-types de référentiels présentés dans la première section de cet article, il s'agirait par exemple de les transposer respectivement, pour les densités de semis à d'autres cultures (par exemple le soja), pour l'érosion à des successions de cultures non encore testées dans le réseau expérimental de base, pour la fertilisation azotée à des produits résiduels organiques inédits (par exemple résidu de méthanisation). Ce caractère a bien entendu des incidences majeures du point de vue des coûts de renouvellement des référentiels. Là encore, la nature et la structure du MDCA sont au cœur du problème, et on perçoit que le caractère explicatif et formalisé de ce dernier est un atout déterminant. Si les référentiels sur les jours disponibles avaient été paramétrables en fonction des données climatiques, ils auraient pu être assez facilement réactualisés. Dans sa version quasi-originelle (tableau 2), le référentiel de Wischmeier et Smith souffre d'un déficit de portabilité face à l'introduction de nouvelles espèces végétales ou à des innovations importantes en matière d'implantation des cultures ou de gestion des résidus de récolte. Ce déficit pourrait être comblé en exprimant le facteur C comme une fonction de divers paramètres, au premier rang desquels la couverture du sol par les plantes ou les résidus. Il pourrait alors être recalibré sans avoir à réitérer de nombreuses expérimentations de terrain.

En poursuivant la réflexion, bien d'autres catégories de critères seront identifiées comme plus ou moins importantes au regard des transitions agricoles en cours et à venir, et redevables d'une analyse qui n'a pu être menée dans le cadre de cet article exploratoire. On pressent notamment l'importance de critères relatifs à la cohérence des référentiels entre eux, et en particulier à l'articulation de référentiels récents avec l'infrastructure des référentiels préexistants, y compris extérieures à l'agronomie (notamment pédologiques ou météorologiques). L'utilité et l'efficacité pour construire des scénarios, mener des évaluations multicritères, ou appuyer la décision publique, sont d'autres exemples de pistes qui peuvent orienter l'identification de critères d'appréciation pertinents.

RTA et référentiel vus comme ressource : usage et partage

Comment les acteurs utilisent-ils les RTA et référentiels, ou les utiliseront-ils dans le futur, pour s'inscrire dans les dynamiques de changement ? La réponse est intimement liée au type de relation agronome-agriculteur et au régime d'innovation qui sous-tendent les évolutions techniques à mettre en œuvre (Boiffin et al, 2022 ; Meynard et al, 2022). Selon les cas, elle peut conditionner, orienter, favoriser ou au contraire entraver la prise en charge des enjeux de transition par les acteurs.

Une question centrale est celle de l'*autonomisation des acteurs*, qui implique une prise de conscience accrue du rôle que jouent et joueront les RTA dans leur processus de décision, et une

meilleure capacité à exprimer leurs attentes en la matière. Les transitions entraînent un accroissement de complexité des leviers techniques mis en œuvre, et par suite des niveaux d'organisation auxquels se situent les évolutions et innovations. Cette complexité croissante tend à renforcer le rôle des acteurs dans la définition des options à prendre, car ce sont eux qui ont la meilleure connaissance du comportement global du système sur lequel, ou dans le cadre duquel, ils agissent. Dans sa relation avec l'agriculteur, l'agronome est donc amené à promouvoir une posture d'accompagnement plutôt que de prescription. En découle un recours croissant à des démarches participatives et itératives, qui reposent soit sur l'élaboration et l'évaluation de scénarios, soit sur un *brain storming* très ouvert au départ, amorcé par la présentation de « cas d'étude inspirants » (Berthet et al., 2018). Dans l'un et l'autre cas, des RTA et référentiels sont mobilisés, de façon plus ou moins explicite. Or dans certains cas – et tout particulièrement quand il s'agit d'élaborer et évaluer des scénarios prospectifs au niveau d'espaces de gestion environnementale ou territoriale - la complexité susmentionnée va de pair avec un degré de sophistication des référentiels qui peut les rendre très difficilement appréhendables par les non-spécialistes²⁴. Cela va à l'encontre de l'autonomisation des acteurs, en les rendant dépendants d'« accompagnateurs » seuls capables de « faire tourner » les modèles et de les alimenter en références adéquates. Ainsi l'autonomisation proclamée peut avoir une face cachée d'inféodation, précisément liée aux tâches « secondaires » d'élaboration et mise en œuvre des référentiels. On ne reviendra pas ici sur les freins ou restrictions découlant de l'absence ou l'inaccessibilité des référentiels. Certaines options innovantes peuvent être inenvisageables, ou susciter de la réticence, si elles sont beaucoup moins documentées que les options conventionnelles. En se plaçant dans le cas où des référentiels existent ou sont en cours d'élaboration, on observera que la conception des RTA et la structure des référentiels correspondants, donnent à leurs utilisateurs un rôle plus ou moins important dans le processus de décision. Trois aspects sont susceptibles de jouer un rôle à cet égard :

- Le caractère plus ou moins prescriptif (ou à l'inverse inspirant) lié à la conception et à la structure du référentiel, comme évoqué précédemment (§ 2.4) ;
- La façon dont sont formalisées et distinguées les options techniques, tout particulièrement si elles portent sur des niveaux d'organisation complexes. Elles peuvent être présentées sous forme de « paquets techniques » normatifs, ou à l'inverse d'« exemples inspirants » décrits de façon neutre, sans obligation forte d'associer les différents types d'intervention technique évoqués, et particulièrement valorisés comme supports d'apprentissage.
- La qualité de présentation, au service de la lisibilité du raisonnement sur lequel reposent la RTA et le référentiel. Si ce dernier est facile d'utilisation et reflète clairement le raisonnement sous-jacent, l'utilisateur est alors d'autant plus en mesure de s'affranchir d'un cheminement particulier dans le référentiel, ne serait-ce qu'en testant diverses variantes, et ainsi de s'en servir de support à la réflexion plutôt que comme guide vers une solution toute faite²⁵. Inversement, si les référentiels se présentent sous forme de tableaux dont les entrées sont codées, annexés à des équations plus ou moins indéchiffrables par le profane, ils constituent pour l'utilisateur une « boîte noire », et ce dernier n'aura d'autre choix que d'accepter ou rejeter les résultats fournis à l'issue d'un cheminement donné.

Une deuxième question cruciale est celle de l'*appropriation des RTA et référentiels*, dont découlent à la fois les modalités de partage et la prise en charge des adaptations et innovations à réaliser. En première approche, le statut des référentiels est déterminé (i) par la nature et le mode de financement des organismes qui les élaborent, et plus précisément assurent la collecte des données nécessaires, ainsi que la mise en forme et la diffusion du « produit fini », sans avoir

²⁴ Le cas n° 58 de l'encadré 1 en est une illustration typique : il s'agit ici de « méta-référentiel » à plusieurs étages, le premier étant un recueil d'équations d'estimation des différents flux de C, N, énergie etc., le deuxième fournissant les valeurs numériques des paramètres de ces équations, etc.

²⁵ Par leur qualité didactique et de présentation, les référentiels mis au point par Arvalis à propos du choix des outils de travail du sol sont de ce point de vue des exemples à suivre.

nécessairement conçu les MDCA sous-jacents et/ou les OAD associés ; (ii) et/ou par le cadre d'usage du référentiel, libre ou réglementaire, et plus ou moins largement partagé :

- Parmi les cas-types de la première partie de ce texte, le seul cas de référentiel élaboré par un organisme public est celui relatif à la conservation des sols (§1.2). Il a un statut de *bien public* d'accès libre et gratuit, et est utilisé dans le cadre de procédures officielles d'attribution de subventions d'état aux agriculteurs. Ce même statut est conféré- cette fois par l'usage réglementaire et non par l'origine de fabrication- aux références et référentiels associés aux méthodes de raisonnement de la fertilisation azotée retenues en application de la Directive Nitrates²⁶.
- Dans la grande majorité des cas aujourd'hui en France, les références et référentiels sont élaborés et diffusés dans le cadre d'organismes professionnels, et cette tâche est une des principales missions qui leur sont reconnues et financées dans le cadre d'une contractualisation avec l'État. Le statut des RTA et référentiels est alors celui d'une *ressource collective mutualisée*. Dans les cas qui ont servi d'illustration à cet article, cette mutualisation est large et l'accès quasi-libre, même s'il n'est pas toujours totalement gratuit²⁷. Mais cette situation n'est pas absolument générale : d'une part, il a pu exister et existe encore, un grand nombre de référentiels informels, créés et utilisés dans le cadre de groupes d'agriculteurs (par exemple les CETA dans le passé) sans publication ni validation externe. D'autre part, des firmes privées ou coopératives diffusent à grande échelle des RTA et référentiels qu'elles ont élaborés en tant qu'outils complémentaires aux services qu'elles assurent à leurs adhérents ou clients, ou aux modes d'emploi des produits qu'elles commercialisent. En dehors de tout *a priori* sur la légitimité de tel ou tel type d'acteur à produire des RTA, le problème de l'objectivité et de la neutralité des RTA et référentiels plus ou moins directement liés à un objectif commercial ne peut être éludé²⁸. Les débats actuels sur la séparation entre vente et conseil le confirment amplement.
- Enfin les RTA et les référentiels peuvent être des *biens privés commercialisables*. Ils pourraient en théorie être « vendus et achetés » en tant que tels puisqu'ils ont un coût de production, de diffusion et une valeur d'usage, mais en pratique ils le sont le plus souvent indirectement en étant « encapsulés » dans un service payant, lui-même souvent associé à un OAD. Ce cas est illustré par les firmes et bureaux d'étude qui proposent des services d'agrométéorologie (prévision des rendements, planification des assolements, programmation de l'irrigation) basés sur les modèles de culture. Mais de façon plus diffuse et occulte il concerne aussi le conseil privé aux agriculteurs. Qu'elle s'exerce à titre individuel ou collectif, cette forme d'accompagnement a forcément pour support un ensemble de référentiels, qui pour certains sont empruntés au pool des ressources communes accessibles, mais pour d'autres sont autoproduits à partir de l'expérience propre au conseiller et à son groupe de clients, et non plus partagés mais au contraire « protégés » comme avantage concurrentiel. Là encore sans jugement *a priori*, on peut s'interroger sur l'efficacité de ce mode d'élaboration des RTA et référentiels, segmenté et confiné, particulièrement en regard des transitions : comme cela a été le cas dans la phase de modernisation, c'est au contraire d'une mutualisation la plus large possible que peut être attendue l'accélération des adaptations. Le caractère collectif de ce processus n'exclut en

²⁶ Cf Préfet de la Région Alsace, 2015. Annexes à l'arrêté préfectoral n° 104/2015 du 6 août 2015 établissant le référentiel régional de mise en œuvre de l'équilibre de la fertilisation azotée pour la région Alsace.

²⁷ Par exemple si les accès aux sites internet, ainsi que les brochures ou revues permettant de les consulter, sont payants.

²⁸ À cet égard l'exemple historique de la fertilisation est éclairant : jusqu'à la fin des années 1960, les firmes d'engrais ont un rôle prépondérant dans l'expérimentation et l'élaboration des références, qui est basée sur l'exploitation statistique des courbes de réponse ... avec pour conséquence une surfertilisation généralisée. À partir du début des années 70, à la faveur du choc pétrolier et du renchérissement des engrais, s'imposent les principes de raisonnement issus des travaux des stations agronomiques départementales et de l'Inra, appuyés sur un ensemble de RTA et référentiels totalement différents, et dont la mutualisation sera organisée dans le cadre du COMIFER. Au cours des années 80, la publication par l'Inra des conclusions des essais de longue durée (Gachon, 1988) instaure de nouveaux paradigmes et amène une « deuxième vague » de renouvellement des OAD, RTA et référentiels.

aucun cas qu'il puisse prendre des formes diverses, le partage et la publicité des informations pouvant être mis en œuvre à différentes échelles, et dans des cercles professionnels plus ou moins restreints selon le degré de technicité requis. On pourrait concevoir que ce caractère collectif ait pour tronc commun minimal une procédure de validation et qualification officielles.

En lien avec les deux points précédents, se pose enfin la question de la *transparence des démarches d'élaboration*. Cette transparence peut grandement influencer l'évolution des RTA et référentiels, car elle conditionne d'une part la confiance des utilisateurs, ainsi que leur possibilité d'émettre des critiques et attentes au sujet des référentiels dont ils disposent, et d'autre part la capacité des acteurs du système de R&D agronomique à faire évoluer ces derniers, ou à en créer de nouveaux. Elle recouvre notamment trois aspects :

- L'explicitation du MDCA sous-jacent, de ses fondements cognitifs, et du degré de validation scientifique dont ils bénéficient.
- L'accès aux modalités d'élaboration, par exemple la couverture du domaine d'application du référentiel lors du recueil des données de base.
- La fourniture d'indications sur les incertitudes et imperfections des RTA qui résultent de ces modalités (en particulier du volume et de la représentativité des données expérimentales recueillies), et de la sensibilité des résultats obtenus à ces incertitudes et imperfections.

Chacun de ces aspects renvoie à une problématique de rédaction et publication, correspondant à des lecteurs et supports différents, depuis la revue scientifique jusqu'à la presse technique, en passant par le site internet. Ces différentes situations correspondent elles-mêmes à des processus de validation et certification plus ou moins consistants et explicites.

Sans entrer plus avant dans l'analyse de ce vaste sujet, on se bornera à souligner l'importance des progrès à accomplir en la matière. Tout en étant limitée et biaisée, la collection d'exemples sur laquelle s'est appuyé cet article montre à cet égard une très forte variabilité, depuis l'opacité quasi-totale jusqu'au modèle de transparence que constituent les travaux de Wischmeier et Smith, ce cas étant malheureusement minoritaire²⁹. Cette situation semble due, non pas à une faiblesse méthodologique et encore moins à l'intention de la masquer, mais plutôt à une présomption généralisée qu'il est sans objet et sans intérêt de faire état des laborieuses et fastidieuses tâches qu'implique l'élaboration d'un référentiel, beaucoup moins valorisantes que celles de création d'un OAD.

Conclusion

L'élaboration de références techniques (RTA) et leur organisation sous forme de référentiels est en agronomie une activité essentielle, qui traduit sous forme opérationnelle le fondement de la discipline, c'est-à-dire l'établissement de relations entre le milieu, les techniques culturales mises en œuvre et les services assurés par les agroécosystèmes. Cette activité est au cœur de la fonction d'accompagnement exercée par le système de recherche-développement agronomique, et est indissociable de la production d'outils et méthodes d'aide à la décision. Même lorsqu'elle se concrétise par une donnée qualitative ou quantitative très concise, la RTA est beaucoup plus qu'un résultat expérimental, et les référentiels correspondants sont beaucoup plus que des synthèses de résultats expérimentaux. Au-delà de l'obtention de données, le statut de RTA et la qualification de référentiel ne s'acquièrent qu'à l'issue d'un travail d'agrégation, de tri, d'établissement de relations, de formalisation et de présentation, aboutissant à ce qu'un utilisateur puisse les intégrer à son processus de décision.

²⁹ Un autre cas qui s'en approche est celui de l'évaluation variétale : en amont de la publication des référentiels, les résultats des expérimentations réalisées dans le cadre de la pré- et de la post-inscription sont publiés et commentés en détail. Sans doute est-ce imputable au caractère hautement compétitif et stratégique de l'innovation variétale, et à l'organisation très encadrée et structurée de la démarche d'évaluation qui accompagne cette innovation.

Face aux transitions et à l'extrême variabilité de trajectoire d'évolution des exploitations, qui en est le corollaire, différentes stratégies pour faire évoluer l'équipement en RTA et référentiels de l'agriculture française, sont envisageables et peuvent se combiner. Une option extrême consiste à « industrialiser » la production de références pour les transitions, en concentrant les ressources financières et humaines sur un petit nombre d'acteurs bien coordonnés, fortement liés à la recherche publique, capables d'assimiler ou engendrer par eux-mêmes les progrès méthodologiques et technologiques nécessaires. Le schéma symétrique consiste à décentraliser, et à la limite à individualiser, la production de RTA, en tirant parti de la démocratisation des capteurs et systèmes d'acquisition et gestion de données, et surtout de l'expertise des acteurs locaux. Pour chaque thème technique, une combinaison appropriée de ces deux options, ou une stratégie intermédiaire, est à déterminer.

Le constat de l'importance du volume d'activité que requiert l'élaboration des RTA et référentiels ne date pas d'hier. En revanche, la complexité et le haut niveau d'exigence méthodologique de cette tâche sont beaucoup moins couramment évoqués, et n'ont guère fait l'objet de réflexions transversales. Le corollaire de cette sous-estimation est un panorama global foisonnant et hétérogène quant à l'accessibilité et à la transparence des référentiels. En regard des enjeux de transitions de l'agriculture, et de l'accroissement exponentiel des besoins quantitatifs et qualitatifs de RTA qui en découlent, cette situation est problématique. Elle peut non seulement être un frein à l'innovation, mais aussi remettre en cause le caractère de bien commun qu'ont jusqu'à présent, en large part, les RTA. L'atomisation, se conjuguant à l'évolution technologique -IA et Big Data en particulier-, peut favoriser la marchandisation d'une part plus ou moins importante des RTA et référentiels, sans garantie que les enjeux des transitions soient pris en compte de façon coordonnée par les acteurs privés. On peut aussi entrevoir un risque de régression de la pertinence agronomique des modèles de connaissance qui sous-tendent les RTA, et par là de dégradation insidieuse de leur qualité. Inversement, les avancées de la modélisation agroécologique et agri-environnementale et les perspectives qu'elles ouvrent en matière d'expérimentation virtuelle, la généralisation de l'évaluation multicritères, la mise en place de grands dispositifs d'enquête et expérimentation pour explorer des voies agronomiques inédites, l'essor des démarches participatives pour repérer les innovations, et amorcer de façon plus précoce leur référencement, constituent des atouts pour opérer un saut qualitatif et quantitatif dans l'élaboration des RTA et référentiels.

Pour maîtriser le coût des investissements nécessaire, mais aussi pour tirer le meilleur parti du foisonnement des initiatives et de la diversification des approches, il faut instaurer une dynamique de réflexion collective permettant d'identifier les besoins prioritaires de références et référentiels liés aux transitions, et de promouvoir une exigence de qualité. Une première étape incontournable est de procéder à un état des lieux, c'est-à-dire un recensement et une caractérisation des référentiels disponibles, à croiser avec l'inventaire des besoins en RTA et référentiels qu'impliquent les transitions, pour repérer les angles morts. Une deuxième orientation consisterait à faire reconnaître l'élaboration des RTA et référentiels comme travail de recherche à part entière, d'une part comme étape de généralisation et application des connaissances acquises sur un thème donné, d'autre part comme sujet de recherche méthodologique transversal. En corollaire, on peut imaginer que des projets-pilotes soient soutenus sur certains cas d'école, choisis en raison de leur valeur heuristique et de leur portée au regard des transitions³⁰. D'autres pistes à creuser seraient celles du parangonnage et d'une qualification des référentiels. Avec toutes celles qui ne manqueront pas d'apparaître si la réflexion esquissée ici se poursuit, ces différentes pistes se

³⁰ Entre autres exemples on peut penser à l'agroforesterie, à la biologie des sols, au travail en agriculture, à la fertilisation azotée. Dans chacun de ces cas, les arguments de choix sont différents : référencement d'une catégorie de systèmes de production « orpheline », émergence d'un thème où il est opportun d'injecter une vision agronomique, enjeu socio-économique majeur insuffisamment étudié, renouvellement lié à de nouveaux paradigmes et principes de raisonnement technique.

résumément à un « mot d'ordre » : identifier les références et référentiels techniques comme sujet à part entière, pour en faire un champ de réflexion et d'échanges, non seulement entre agronomes, mais aussi entre ces derniers et les autres métiers créateurs ou utilisateurs de références en agriculture, alimentation et environnement, au premier rang desquels les économistes.

Bibliographie

- Andriulo, A., Mary, B., Guérif, J., 1999. *Modelling soil carbon dynamics with various cropping sequences on the rolling pampas*. *Agronomie* pp 365-377
- Angevin, F., Constantin, J., Boiffin, J., 2020. L'expérimentation numérique et l'évaluation multicritères : deux approches pour éclairer les choix en matière d'implantation des cultures. In : *Réussir l'implantation des cultures. Enjeux agroécologiques, itinéraires techniques*. Boiffin, J., Laurent, F., Richard, G., (Coord.), Editions Quae & Arvalis, pp 397-417
- Aubry, C., 1994. *De la parcelle cultivée à la sole d'une culture : des échelles complémentaires de conception de références techniques*. INRA-SAD, Symposium International, Montpellier 21-25 novembre 1994, pp 519-529
- Berthet, E., Vourc'h, G., Brun, J., Meynard, J.-M., Prost, L., Salembier, C., 2018. *Guide pratique pour organiser et piloter un processus collectif de conception*. INRA, 44 p.
- Boiffin, J., Caneill, J., Messean, A., Trebuil, G., 2022. Evolution des approches, méthodes et outils de l'agronomie. In : *La Fabrique de l'agronomie. De 1945 à nos jours*. Boiffin J., Doré T., Kockmann F., Papy F., Prévost P., coord., Editions Quae, Versailles, pp 69-125.
- Brisson, N., Levrault, F., (coords), 2010. *Changement climatique, agriculture et forêt en France : simulations d'impacts sur les principales espèces. Le Livre vert du projet CLIMATOR (2007-2010)*, Ademe Editions, Angers, 336 p.
- Brisson N., Mary B., Ripoche D., Jeuffroy M.-H., Ruget F., Gate P. et al., 1998. STICS: a generic model for the simulation of crops and their water and nitrogen balance. I- Theory and parametrization applied to wheat and corn. *Agronomie*, 18, 311-346.
- Capillon, A., 1985 : *Connaître la diversité des exploitations : un préalable à la recherche de références techniques régionales*. *Agriscopes* 6, 31-40
- Casadebaig, P., Mestries, E., Debaeke, P., 2016. A model-based approach to assist variety evaluation in sunflower crop. *European Journal of Agronomy*, 81, pp.92-105. <https://doi.org/10.1016/j.eja.2016.09.001>
- Chanzy A., Bruckler L., 1993. Significance of soil surface moisture with respect to daily bare soil evaporation. *Water Resour. Res.* Vol 29 Issue 4, 1113-1125
- Chaussod, R. et Nouaïm, R., 2019. « Qualité biologique » des sols cultivés : évolution des concepts et des outils de diagnostic. In : *14èmes Rencontres de la Fertilisation Raisonnée et de l'Analyse*, Dijon, 20-21/11/2019.
- Collectif, 1996. Les potentialités agricoles ; méthodes d'études et domaines d'application. *Chambres d'agriculture*, supplément au N°843, 48 p.
- Collectif, 2015. *Guide technique AGRIMIEUX fertilisation des grandes cultures*. Chambre d'agriculture Région Alsace, 36 p.
- Collectif, 2022. Être agronome en contexte de transitions. *Agronomie, Environnement & Sociétés*, n°12-2, 206 p.
- COMIFER (Groupe technique azote), 1996. *Calcul de la fertilisation azotée des cultures annuelles - Guide méthodologique pour l'établissement des prescriptions locales*, 2^{ème} édition ed. COMIFER, Paris
- Debaeke, P., Bret-Mestries, E., Aubertot, J.-N., Casadebaig, P., Champolivier, L., Dejoux, J.-F., Maury, P., Seassau, C., 2020. *Sunflower agronomy: 10 years of research in partnership within the "Sunflower" Technological Joint Unit (UMT) in Toulouse*. OCL 27 : 14.
- Deguine, J.-P., Gloanec, C., Laurent, P., Ratnadass, A., Aubertot, J.-N., coord., 2016. *Protection agroécologique des cultures*. Editions Quae, Versailles, 288 p.
- Dürr C., Capillon A., Manichon H., Sebillotte M., Lépine M., 1979 a. *Cycle Pratique du conseil en agronomie, session fertilisation*, fiche n° 1, APCA, Trie-Château, 15 p. et annexes.
- Dürr C. Manichon H., Sebillotte M., 1979 b. *Cycle Pratique du conseil en agronomie, session travail du sol*, fiche n° 1, APCA, Trie-Château, 11 p. et annexes.
- Evrard P., Vedel G., 2003. Développement agricole : réinventer le modèle à la française. *Club Demeter*, cahier n°11, 69 p.
- Fabre, B., Kockmann, F., 1987. Relance du chaulage en Bresse Chalonnaise. Mise en place d'un protocole d'étude et premiers résultats. *Bulletin Technique d'Information*. N° 416 pp 3-19.
- Fournet M.J., Ortscheit D., 1985. Répercussions des amendements calcaires sur les limons battants en Bresse Chalonnaise. Mémoire de fin d'études ISARA Lyon. 95 p.
- Gachon L., Boniface R., XX, (coord.), 1988. *Phosphore et potassium dans les relations sol-plante : conséquences sur la fertilisation*. Inra éditions, Versailles, 566 p.
- Hopquin, J.P., Girard, G., Hot, J.P., Quiévreux, D., 1996. Une typologie des exploitations pour produire et utiliser des références. L'exemple du conseil en itinéraire technique du blé en Picardie. *Actes du colloque « Aide à la décision et choix de stratégies dans les entreprises agricoles »*, Laon, Maison des Arts et Loisirs, 10 et 11 décembre 1996, INRA -Conseil régional de Picardie-Biopôle, 145-152.

Jeuffroy M.-H., Ravier C., Lenoir A., Meynard J.-M., 2020. Appi-N : une nouvelle approche pour le raisonnement de la fertilisation azotée du blé. *Agronomie, environnement & sociétés*, 9 (1).

Keller T., Defossez P., Weisskopf P., Arvidsson J., Richard G., 2007. SoilFlex: A model for prediction of soil stresses and soil compaction due to agricultural field traffic including a synthesis of analytical approaches. *Soil and Tillage Research*, 93 (2), 391-411, <https://doi.org/10.1016/j.still.2006.05.012>, <https://hal.inrae.fr/hal-02658042>

Kockmann, F., 1990. *Chaulage et fertilité en limons battants hydromorphes. Dossier technique à l'attention des conseillers*. Chambre d'agriculture de Saône et Loire, avec le concours du CEREF ISARA, 32p.

Kockmann F., Fabre B., Chaussod R., 1990 – Le chaulage en limons battants, *Perspectives agricoles*, n° 144, p. 37-48.

Kockmann F., Pouzet A., 2022. Contribution du système de développement agricole à la dynamique de l'agronomie. In : *La Fabrique de l'agronomie. De 1945 à nos jours*. Boiffin J., Doré T., Kockmann F., Papy F., Prévost P., coord., Éditions Quæ, Versailles, p. 363-408

Lachaud J-P, 1960. Les références concernant les rendements physiques des cultures destinées à la vente. *Économie rurale* 43, 9-25

Laroche, B., Degan, F., Koller, R., Scheurer, O., Bouthier, A., Moulin, J., Sauter, J., Ducommun, C., Fort, J.-L., Maillant, S., Party, J.-P., Renouard, C., Saby, N., Bertouy, B., 2020. TYPTERRRES Vers une typologie agronomique partagée. *Etude et Gestion des Sols* 27, 241-255.

Lemanceau, P., Le Roux, X., Martin, F., 2009. L'écologie microbienne du sol, vers une approche intégrée, In : *Le Sol*, Dossier INRAE, janvier 2009, 68-73.

Limaux, F., Meynard, J.-M., 1992. Céréaliculture : la désintensification d'ores et déjà rentable. *Aménagement et Nature* n°105, p. 16-19.

Meynard, J.-M., Messéan, A. (coord.), 2014. *La diversification des cultures. Lever les obstacles agronomiques et économiques*. Éditions Quæ, Versailles, 104 p.

Meynard, J.-M., Salembier, C., Cerf, M., 2022. L'innovation au cœur de l'histoire de l'agronomie. In : *La Fabrique de l'agronomie. De 1945 à nos jours*. Boiffin J., Doré T., Kockmann F., Papy F., Prévost P., coord., Éditions Quæ, Versailles, p. 211-243.

Mouchet C., Bortzmeyer M., Couvreur S., Meynard J.-M., Mischler P., Pageot S., Raiffaud C., Viaux P., 2011. Communiqué « Quel référentiel pour l'agriculture biologique ? » suite à la conférence de consensus du 9 février 2011, Programme CASDAR RéfAB (2010-2012), 4 p.

Petit M.-S., Reau R., Dumas M., Moraine M., Omon B., Josse S., 2012. Mise au point de systèmes de culture innovants par un réseau d'agriculteurs et production de ressources pour le conseil, présenté lors du colloque du RMT Systèmes de culture innovants, 21 octobre 2011, *Innovations agronomiques* n°20, 79-100.

Paquette G., 2002. *Modélisation des connaissances et des compétences. Un langage graphique pour concevoir et apprendre* (). Presses de l'Université du Québec, Montréal, 388 p.

Pinochet, X., Debaeke, P., Casadebaig, P., Mestries, E., Langlade, N.-B., 2020. SUNFLO, un modèle au service de l'amélioration des tourmesols. *Perspectives agricoles*, 480, p. 55-57.

Reau R., Cros C., Leprun B., Mérot E., Omon B., Paravano L., 2016. La construction des schémas décisionnels et leurs mobilisations dans le changement des systèmes de culture. *Agronomie, Environnement et Sociétés*, vol 6, 2, 14.

Rémy J., Brives H., Lémery B. (coord.), 2006. *Conseiller en agriculture*. Educagri éditions/ Inra éditions, Dijon, Paris, 272 p.

Ricci P., Bui S., Lamine C. (coord.), 2011. *Repenser la protection des cultures : innovations et transitions*. Quæ/Educagri, collection Sciences en partage, Versailles, 250 p.

Schaub, A., 2021. *Accompagner les agriculteurs pour des exploitations agricoles multiperformantes en Grand Est. Acquis du projet "Mes Perspectives"*. Chambre d'Agriculture Grand Est - IDELE - ENSAIA - RESOLIA. 59 p.

Sebillotte M., 1978. La collecte des références et les progrès de la connaissance agronomique. In : *Exigences nouvelles pour l'agriculture : les systèmes de production pourront-ils s'adapter ?* Boiffin J., Huet P., Sebillotte M., coord., ADEPRINA-INA PG, pp 466-496

Sillon J.F., 1999. *Modélisation des conditions hydriques d'intervention dans un champ cultivé. Application à la prévision des jours disponibles*. Thèse de Doctorat de l'INA Paris-Grignon, 146 p.

Smith D.H., Wischmeier W.H., 1962. Rainfall erosion. *Advances in agronomy* 14, 109-148

Soenen, B., Cohan, J.P., Jeuffroy, M.H., Meynard, J.M., Ravier C., 2017. Fertilisation azotée du blé : raisonner sans objectif de rendement. *Perspectives Agricoles* 445

Tirel, J.C., 1993. La démarche des Secteurs de Référence Irrigation. *Aménagement et Nature*, 111, 12-15

Torquebiau, E., 2022. *Le livre de l'agroforesterie : comment les arbres peuvent sauver l'agriculture*. Actes Sud, Arles. 304 p.

Urbano G., 1996. Objectifs et démarche d'une opération Secteurs de Références. *C.R.Acad.Agric.Fr.*, 82, 25-36.

Urbano, G., Boulet, P., Duclay, E., 1996. La démarche « secteur de références » comme contribution à l'aide à la décision stratégique. *Actes du colloque « Aide à la décision et choix de stratégies dans les entreprises agricoles »*, Laon, Maison des Arts et Loisirs, 10 et 11 décembre 1996, INRA - Conseil régional de Picardie-Biopôle, 167-181.

Vindras, C., Experton, C., Cresson, C., Fourié, L., 2013. *Référentiel AB : glossaire*. Institut Technique de l'Agriculture Biologique. 12 p.

Wischmeier W.H., Smith D.H., 1965. *Predicting rainfall erosion losses from cropland east of the Rocky Mountains. Guide for selection of practices for soil and water conservation*. Agriculture handbook N° 282. Agricultural Research Service, USDA, in cooperation with Purdue Agricultural Experimental Station, Washington D.C., 47p.

Annexe

Diversité des références et référentiels techniques en agronomie : exemples illustratifs

L'étude de cas dans la première section de l'article a mis en évidence plusieurs traits fondamentaux des RTA et référentiels correspondants, qui permettent de leur appliquer un cadre d'analyse commun tout en constituant des caractères de différenciation : domaine agronomique concerné, formulation des trois éléments constitutifs, relation entre ces éléments et modèle de connaissance sous-jacent, démarche d'élaboration, modalités d'intégration aux processus de décision et d'accompagnement. Pour tester la robustesse de ce cadre d'analyse, une soixantaine d'exemples supplémentaires de référentiels dont les auteurs ont pu avoir connaissance au cours de leurs parcours professionnels, sont examinés selon cette grille.

Catégories et types de décisions techniques

Le tableau 3 et l'encadré 1 présentent la répartition des 65 exemples³¹ selon un inventaire schématique distinguant les domaines techniques sur lesquels portent les décisions, au sein desquels sont identifiés des sous-domaines plus précis. Ces décisions peuvent être d'ordre stratégique ou tactique, et les niveaux d'organisation concernés vont de la parcelle (voire même du niveau intra-parcellaire) à l'espace de gestion correspondant à divers types de finalités socio-économiques et/ou environnementales³². Compte tenu de son caractère contingent et biaisé, cette démarche ne constitue pas un véritable état des lieux³³. On se bornera donc à quelques remarques, qui pourraient aiguiller le travail de diagnostic qui reste à faire :

- Les différents domaines et sous-domaines correspondant aux exemples collectés couvrent une large part du champ de l'agronomie, avec cependant quelques points faibles. Sous réserve qu'elles ne soient pas des artefacts liés aux limites et contraintes de l'étude, certaines de ces lacunes sont surprenantes au vu de l'utilité potentielle de la RTA correspondante : c'est le cas des *rendements-objectifs* et des *jours disponibles*, très faiblement référencés (les n° 36 et n° 39 sont des exceptions) alors que ces thèmes sont à la base de raisonnements tactiques ou stratégiques majeurs ; en revanche on s'étonne moins de la faible couverture du secteur de la gestion de la biodiversité, dans lequel l'investissement de la recherche-développement agronomique est récent.
- Cette collection s'étale dans le temps depuis les toutes premières étapes de construction de l'agronomie en tant que discipline scientifique et technique jusqu'à nos jours, avec une permanence de la structure tripolaire mise en évidence précédemment. En revanche, certains sujets sont couverts depuis les années 1960 (travail du sol (n° 6), conservation des sols (n° 11)), avec un renouvellement parfois annuel (choix variétal, protection phytosanitaire ...) alors que d'autres ne sont couverts que depuis peu (gestion de l'environnement autre que la lutte contre la pollution nitrique ou l'épandage des boues), d'autres enfin ont été couverts dans le passé mais sans renouvellement jusqu'à très récemment³⁴.
- Selon les catégories il y a des différences assez marquées quant à l'identité des producteurs de RTA et référentiels : les instituts techniques agricoles sont prédominants pour les

³¹ Les quatre cas présentés en première section de l'article et 61 exemples supplémentaires.

³² Tels que bassin hydrographique, aire de collecte, aire d'AOP, etc.

³³ En particulier, on n'a cherché ni à couvrir les différentes filières végétales, ni à inventorier de façon systématique les RTA et référentiels émanant des firmes privées ou du secteur coopératif.

³⁴ C'est typiquement le cas du thème « jours disponibles » qui n'a été réactivé qu'en 2019 dans le cadre du projet Casdar J-Distas. <https://www.arvalis.fr/recherche-innovation/nos-travaux-de-recherche/j-distas>

décisions techniques en rapport direct avec la production, sauf pour la fertilisation où intervient le COMIFER en tant qu'instance fédératrice ; pour les sujets environnementaux l'ADEME³⁵ (et en arrière-plan le Citepa³⁶) joue aujourd'hui un rôle primordial ; certaines réalisations marquantes sont à mettre à l'actif d'acteurs régionaux tels que les chambres d'agriculture, mais elles relèvent de domaines variés sans orientation thématique privilégiée : ces acteurs interviennent pour combler les lacunes de l'état de l'art à l'échelle nationale sur des sujets à enjeu régional fort.

- Il en va de même pour certains exemples issus d'instances de coopération inter-organismes tels que les Unités ou Réseaux Mixtes Technologiques (UMT, RMT), ou associations régionales (Agrotransfert, AREAS³⁷, ARAA³⁸...). Si ce n'est à travers sa participation à ce type d'instances, la recherche publique est peu productrice de RTA et référentiels, alors même qu'elle en est fortement utilisatrice dans le cadre des expertises et études collectives.
- Il y a une grande hétérogénéité dans la nature des supports (plaquettes, brochures, réglottes, articles de presse, outils en ligne, etc.), et en corollaire dans le mode et la qualité de présentation : ainsi la revue *Perspectives Agricoles*, pilotée par les instituts techniques Arvalis et Terres Inovia, a développé depuis longtemps un style de présentation homogène qui facilite considérablement l'appréhension de référentiels parfois complexes ; inversement les référentiels associés aux outils en ligne pour la gestion de l'environnement sont pour beaucoup d'entre eux difficiles d'accès, voire confidentiels, et leur lecture relève du décryptage, alors même que l'outil d'aide à la décision (OAD) proprement dit peut faire l'objet d'un gros effort de présentation.

Commenté [j5] : Ne peut-on éviter le grand vide ci-dessous ?

Commenté [RK6R5] : J'ai introduit des espaces post paragraphe de 6 points pour occuper un peu d'espace ...

³⁵ Agence de la transition écologique

³⁶ Centre Interprofessionnel Technique d'Études de la Pollution Atmosphérique

³⁷ Association de recherche sur le Ruissellement, l'Erosion et l'Aménagement du Sol

³⁸ Association pour la Relance Agronomique en Alsace

Tableau 3 : Classification (non exhaustive) des domaines et sous-domaines agronomiques utilisée pour présenter les exemples de référentiels dans l'encadré 1.

Domaine	Code domaine	Sous-domaine	Code sous-domaine
Choix du matériel végétal	CMV	Espèces principales	EPPLE
		Association d'espèces	ASSO
		Cultures intermédiaires	CI
		Choix variétal	VAR
Implantation des cultures	IC	Travail du sol	TDS
		Date et densité de semis	DDS
Fertilisation, amendements, fertilité du sol	FERT	Composition des plantes en éléments minéraux et besoins des cultures	COMPP
		Composition et valeur agronomique des matières fertilisantes	MFERT
		Fertilisation azotée	AZOTE
		Fertilisation P-K-Mg	PKMG
		Oligo-éléments	OLI
		Entretien organique	ORG
		Entretien calcique / chaulage	CALC
		Fertilité biologique	BIO
Protection phyto / santé des plantes	PPSP	Adventices	ADV
		Maladies	MALAD
		Ravageurs	RAVAG
Système de culture	SDC	Systèmes économes en phytos	ECOPP
		Cultures dérobées	DEROB
		Gestion de l'interculture	INTERC
Système fourrager	SYSF	Potentialités des prairies permanentes	POTPP
		Gestion du pâturage	GESPAT
Assolement, équipement, main d'œuvre	AEMO	Jours disponibles	JDISP
		Classement et choix des cultures	CCC
Conservation des sols, aménagements fonciers	SOL	Lutte contre l'érosion hydrique	EROS
		Drainage	DRAIN
Gestion quantitative de l'eau	EAU	Irrigation	IRRIG
Gestion de l'environnement	ENV	Qualité de l'air	AIR
		Pertes d'azote (toutes formes)	AZOTE
		Pertes d'azote (nitrates)	NO ₃
		Phytopathogènes : qualité des eaux	PPS
		Contaminants métalliques dans les sols	ETM
		Consommation d'énergie et émission de GES	W&GES
		Stockage de carbone dans les sols	COSOL
		Impacts environnementaux des produits agricoles et alimentaires	IMPAC
Qualité des productions	QUAL	Risque de toxicité des produits récoltés	TOX

Expression et mise en forme des éléments constitutifs des RTA

Les modalités techniques de l'action concernée peuvent être décrites et distinguées de façon très variable :

- alternative oui/non (par exemple traitement ou impasse face à un bioagresseur particulier) ;
- modalités qualitatives plus ou moins nombreuses et pouvant correspondre à différents niveaux d'organisation : opération élémentaire (par exemple dans le cas du choix d'un outil de travail du sol), maillon d'itinéraire technique (Itk) ou Itk complet, composante du système de culture (Sdc) ou Sdc complet, sous-ensemble du système de production (Sdp) ou Sdp entier (par exemple dans le cas des typologies d'exploitation) ;
- valeurs quantitatives, pouvant être ordonnées et découpées en classes, comme dans le premier exemple donné ci-dessus à propos des densités de semis.

La caractérisation reste parfois très globale pour ne pas dire évasive : c'est le cas pour la gestion de la « fertilité biologique des sols » où les différentes variantes techniques considérées sont plutôt des modes d'occupation des sols sans définition explicite des traits distinctifs des Sdc concernés. On peut présumer que cette situation correspond au caractère récent voire préliminaire du référentiel, et à l'incomplétude des connaissances sous-jacentes, tout particulièrement concernant l'influence des techniques sur les processus concernés.

La même diversité d'approches s'observe pour le contexte écologique et socio-économique :

- Les sols peuvent être caractérisés par l'intermédiaire de mesures élémentaires (par exemple le pH), d'indices composites quantitatifs calculés (par exemple RU et RFU, Réservoir Utile ou Facilement Utilisable), de propriétés ou types de comportements synthétiques répartis en classes qualitatives (texture, comportements mécaniques), ou de typologies. Dans ce dernier cas, la pertinence agronomique et la précision des diverses typologies disponibles sont à examiner³⁹.
- Le climat peut être caractérisé par des données élémentaires (température, pluviométrie etc.), par des indices plus complexes (bilans hydriques ; sommes de températures, indices agroclimatiques intégrant des variables phénologiques...), et/ou de façon plus grossière par l'appartenance à des zones géographiques plus ou moins étendues.
- Le système de production est caractérisé, s'il y a lieu, par des catégories de systèmes plus ou moins sommaires, ou par des typologies d'exploitations. Ce dernier cas ne concerne que des référentiels établis à l'échelle régionale.
- Enfin de nombreux référentiels décrivent le contexte selon des démarches combinatoires. Il peut s'agir (i) d'indices globaux spécifiques de l'action technique considérée (par exemple le niveau de risque fusariose), (ii) de typologie multicritère (combinaison de caractères relatifs au climat, au sol et éventuellement à des données relatives au système de production), aboutissant à des classes définies de façon explicite, comme dans l'exemple des densités de semis du tournesol (tableau 1), (iii) d'ensembles régionaux de plus ou moins grande dimension, qui combinent de façon implicite les caractères précédents : c'est le cas des références sur les variétés.

Quant au résultat obtenu ou recherché, il peut être selon les cas, exprimé ...

- de façon là encore plus ou moins explicite, et parfois totalement implicite quand la référence est exprimée sous forme de recommandation : un traitement phytosanitaire prescrit est présumé efficace pour maintenir le bioagresseur en deçà du seuil de nuisibilité ; le chaulage prescrit est présumé entraîner une amélioration globale des comportements du

³⁹ Elles diffèrent notamment selon que les typologies sont fondées sur des bases purement descriptives, ou pédogénétiques, en relation avec les échelles de cartographie. Récemment, une méthodologie (Typterras) a été conçue pour établir dans chaque région des typologies agronomiques de sol exhaustives sur la base de traits fonctionnels (réservoir, milieu d'accueil de la plante, support des interventions culturales, régulateur des cycles, stockage du carbone) en exploitant les Référentiels Régionaux Pédologiques (Laroche et al, 2020).

sol ;

- de façon mono ou multicritère, ce dernier cas étant de plus en plus fréquent dès lors que la prise en compte des performances environnementales devient incontournable à côté des performances technico-économiques⁴⁰ ;
- en classes qualitatives ou quantitatives ordonnées, référées à un degré de satisfaction (cas de certains référentiels relatifs au choix des outils de travail du sol) ;
- par des valeurs numériques référées à un gradient (cas des fournitures azotées, cf. figure 1).

Contenu cognitif : modèles de connaissance agronomique, démarches d'élaboration

Ces éléments ne font pas systématiquement l'objet d'indications dans la présentation des référentiels et sont donc parfois difficiles à déterminer.

Cependant la collection d'exemples de l'encadré 1 montre une très grande diversité dans la structure et la complexité des modèles de connaissance agronomique sous-jacents aux RTA. Certaines références (notamment relatives à l'évaluation variétale ou aux traitements phytosanitaires) reposent sur un schéma simple de relation directe entre modalités techniques et performance obtenue, qui peut être déduit soit d'une connaissance experte, soit de résultats d'expérimentation ou d'enquête. Cela ne signifie pas nécessairement qu'elles sont dénuées de tout fondement explicatif (par exemple dans le cas de l'utilisation de tel ou tel produit phytosanitaire, on connaît les types de processus biologiques impactés par la substance active qu'il contient), mais cette connaissance n'est pas ou guère mobilisée dans l'élaboration de la RTA. À l'opposé, certaines références reposent sur un schéma relationnel à la fois explicite et complexe, comme dans le cas du chaulage (quatrième exemple cf. texte principal première section). Si on se réfère à une typologie sommaire des MDCA, en distinguant quatre grands types de schémas relationnels établis entre modalités techniques et résultats attendus (colonnes A à D du tableau 4), on peut classer la majorité des exemples en correspondance avec ces différents cas. Cependant il existe des cas composites ou intermédiaires qui se situent à des degrés variables sur un gradient empirique-explicatif⁴¹, et ne peuvent se rattacher de façon tranchée aux types principaux, d'où l'ajout d'une 5^{ème} classe (colonne E).

Tableau 4 : Croisement entre modèle de connaissance et méthode d'acquisition des données permettant de fixer les valeurs de RTA, pour les exemples de référentiels de l'encadré 1.

- A. Relation empirique à dire d'expert
- B. Relation empirique « boîte noire », établie par voie statistique
- C. Relation semi-empirique étayée par un modèle explicatif (qualitatif ou quantitatif)
- D. Modèle explicatif quantitatif
- E. Combinaison de plusieurs des variantes mentionnées ci-dessus

Les chiffres correspondent aux numéros des exemples déclinés dans l'encadré n°1 ; lorsqu'ils sont en italique, les exemples ont mobilisé plusieurs méthodes d'acquisition et apparaissent en conséquence à plusieurs reprises. Certains exemples reposent sur un MDCA principal et secondairement sur un ou deux MDCA, alors indiqués en lettre minuscule.

⁴⁰ Comme illustré par l'évolution des référentiels d'évaluation variétale au cours des deux dernières décennies.

⁴¹ Dans le cas relatif à la fertilisation azotée du maïs, la performance est monocritère (fourniture d'azote minéral). La complexité provient avant tout de la pluralité des sources d'azote minéral. C'est aussi en raison de la multiplicité des flux à estimer que le référencement des émissions de GES à l'échelle régionale (n°58) apparaît particulièrement complexe : l'OAD Climagri met en œuvre plusieurs dizaines d'équations d'estimation, chacune comportant un nombre variable de paramètres à documenter.

Modèle de connaissance → Méthodes d'acquisition	A	B	C	D	E
1 -Expérimentation unique	27		25 35	52 57 ^{cb} 58 ^{cb} 60 ^{cb}	
2 - Réseau expérimental multi-local		2 ^{ca} 4 ^{ac} 5 ^{ac} 10 61 ^{ac}	16 33 ^{ab} 50 II III 9 ^{ab} 14 18	57 ^{cb} 58 ^{cb} 60 ^{cb}	1CD ICD 34CD
3 - Collecte d'observations sans protocole défini	3 6 39 40 ^b 44	13 41 ^a	11 9 ^{ab}	57 ^{cb} 58 ^{cb} 60 ^{cb}	
4 - Enquête	31 ^b 39 40 ^b	8 12 41 ^a 56 61 ^{ac}	26 29 38 14	36 42 59 ^{cb} 57 ^{cb} 58 ^{cb} 60 ^{cb}	30AB
5 - Combinaison Enquête-Expérimentation	32 ^b		23 24 28 37 II III IV ^{ab} 22 ^{ab}	21 57 ^{cb} 58 ^{cb} 60 ^{cb}	
6 - Simulation par modèle numérique		56		7 ^b 20 45 47 51 21 36 42 52 59 ^{cb} 57 ^{cb} 58 ^{cb} 60 ^{cb}	1CD ICD 34CD
7 - Combinaison expérimentation réelle-expérimentation virtuelle				49 57 ^{cb} 58 ^{cb} 60 ^{cb}	
8 - Synthèse de données issues de la bibliographie scientifique	44	55 12 13	15 17 19 ^b 43 46 48 53 54 IV ^{ab} 18 22 ^{ab}	49 57 ^{cb} 58 ^{cb} 60 ^{cb}	

Dans les cas où les démarches d'élaboration des référentiels sont explicitées, on peut discerner trois grandes phases :

- l'acquisition de données, selon les différents types de méthodes qu'il est classique de distinguer en agronomie (cf. lignes du tableau 4) ;
- la synthèse et la mise en forme de ces données, qui établissent la structure du référentiel et aboutissent à un prototype ;
- la validation, qui peut elle-même se décomposer en deux phases, l'une initiale portant sur la reproductibilité des relations entre les trois éléments constitutifs de la RTA⁴², l'autre en cours d'usage et qui peut amener à des perfectionnements, voire à des évolutions importantes du référentiel. L'une comme l'autre suppose des dispositifs adaptés, d'enquête et/ou expérimentation dans le premier cas, de collecte et interprétation des « retours d'expérience » dans le deuxième.

À l'examen du tableau 4, on observe une répartition non aléatoire des exemples, qui indique que les méthodes d'acquisition des données sont pour partie dépendantes du MDCA qui sous-tend le référentiel. Cette dépendance serait à confirmer et préciser sur un échantillon plus large, de surcroît moins contingent de l'expérience des auteurs.

⁴² Comme illustré par l'évaluation post-inscription des variétés, cette phase peut comporter une importante « deuxième vague » d'acquisition de données.

Bien que s'accompagnant d'une assez large diversité de combinaisons entre MDCA et méthodes (les exemples se répartissant dans pas moins de 27 cases du tableau), cette dépendance renforce la présomption que l'élaboration des RTA et référentiels constitue un champ de recherche méthodologique à part entière, qui pourrait déboucher sur des principes voire des recommandations pour guider cette élaboration.

Au-delà de la validation proprement dite, certains référentiels (tout particulièrement ceux relatifs à l'évaluation variétale) sont adossés à des dispositifs quasi-permanents d'acquisition des données, qui permettent d'actualiser et compléter en permanence les RTA voire de modifier « chemin faisant » le contenu et la forme des référentiels. Cette évolutivité se traduit par des modifications plus ou moins perceptibles dans la présentation : simplification ou au contraire complexification – comme dans le cas de l'évaluation multicritère des variétés - et accroissement de précision des RTA. Cette élaboration progressive et séquentielle peut aussi se voir comme un processus de maturation des données agronomiques, qui de simples résultats expérimentaux situés dans le temps et dans l'espace, s'accroissent, se reproduisent et acquièrent de plus en plus de généralité et de précision dans leur relation au contexte. Cette maturation concerne notamment la relation référence-décision technique : au départ, cette relation peut être extrêmement floue, et le caractère « technique » de la RTA se limite au rattachement à un grand type d'occupation des sols. Pour l'utilisateur, ces « proto-références » ont une fonction de diagnostic global, et d'alerte éventuelle sur des situations hors norme⁴³, plutôt que de guidage du processus de décision.

Plus généralement, l'évolution des références et référentiels est tributaire du renouvellement des connaissances en agronomie et des changements de paradigmes qui peuvent survenir. Dès lors qu'ils remettent en cause les MDCA sur lesquels se fondent les RTA, ces avancées déstabilisent l'édifice laborieusement construit que constitue à un moment donné la panoplie de référentiels relative à un domaine. Ainsi, la substitution du modèle bi compartimental AMG de dynamique des matières organiques du sol (Andriulo et al, 1999) au modèle mono compartimental classique de Hénin-Dupuis oblige à recalibrer les référentiels relatifs à la gestion du statut organique des sols. Bien plus profonde est la rupture qu'induisent les nouveaux paradigmes et l'émergence de nouvelles démarches pour raisonner la fertilisation azotée, qui mobilisent des types de RTA de nature complètement inédite (Jeuffroy et al, 2020). L'évolution du contexte, et tout particulièrement le changement climatique, peut aussi être un facteur d'obsolescence des RTA, avec la nécessité d'un renouvellement plus ou moins fondamental des référentiels. C'est typiquement le cas des RTA où le contexte est caractérisé par un découpage en zones pédoclimatiques (par exemple celles relatives aux jours disponibles ou à l'évaluation variétale), fondé sur un postulat de stabilité de la distribution des données climatiques.

Rapports entre référence, décision et accompagnement

Les exemples donnés dans la première partie de l'article correspondent à des logiques de raisonnement technique différentes, et en corollaire à des *modalités différentes d'insertion des RTA dans les schémas décisionnels*. En élargissant la gamme de cas étudiés, on observe que cette insertion est plus ou moins directe, et que les cas recensés se répartissent, de ce point de vue, entre deux situations contrastées :

- *L'imbrication* : la RTA qualifie et/ou évalue directement une modalité technique, voire la recommande. En corollaire, pour l'utilisateur, le référentiel et l'OAD coïncident : c'est par l'intermédiaire du référentiel que l'OAD lui est fourni. Le référentiel relatif aux densités de semis du tournesol (cf. tableau 1 du texte principal) correspond typiquement à cette situation.

⁴³ En l'état actuel, la notion de « proto-référence » correspond au cas des diagnostics de biologie des sols. Cette situation est d'ailleurs très évolutive, en lien avec les progrès des méthodes de caractérisation biologique des sols. Il est donc particulièrement intéressant de le suivre.

- *Le découplage* : la RTA se situe en amont du processus de décision et de l'OAD qui cherche à l'appuyer, voire à s'y substituer. La RTA peut ainsi consister en une valeur de variable d'entrée ou de paramètre nécessaire pour « alimenter » un OAD, comme on l'a vu pour le calcul des doses d'apport azoté selon la méthode du bilan. Le cas des jours disponibles relève également de cette catégorie.

À chacun de ces deux cas correspondent des risques opposés de confusion entre référentiel et OAD, et de masquage de l'un par l'autre. En cas d'*imbrication*, l'usage du référentiel et le caractère plus ou moins implicite du raisonnement sous-jacent peuvent faire oublier ce dernier et rendre d'autant plus difficile son actualisation et son perfectionnement⁴⁴. Inversement, le *découplage* peut parfois s'accompagner d'une disparition de la RTA aux yeux de l'utilisateur. C'est le cas pour de nombreux OAD disponibles « en ligne » via internet, qui mobilisent quasi-automatiquement des valeurs par défaut pour renseigner un grand nombre de paramètres.

Un deuxième point de vue concerne *le type d'accompagnement auquel s'accorde la RTA*. Là encore, la collection d'exemples réunie fait apparaître un gradient entre deux extrêmes :

- *La prescription* : la RTA cible une modalité recommandée ; le référentiel est conçu pour guider l'utilisateur en lui économisant l'étape de comparaison et tri des options.
- *L'inspiration* : la RTA documente chaque option présentée sans guider le choix autrement qu'en offrant des possibilités de comparaison. L'évaluation multicritère est particulièrement en concordance avec cette modalité, car elle permet aux acteurs de jouer, non seulement sur le choix des options et scénarios à comparer, mais aussi sur la pondération des critères d'évaluation des résultats obtenus.

On notera que ces deux cas se distinguent par l'ordonnement des éléments constitutifs de la RTA, et par le sens de lecture du référentiel. Dans le premier cas, on « entre » dans le référentiel par le contexte propre à la situation considérée, et on en « sort » par l'option technique recommandée. Si le cheminement part des modalités techniques, pour aboutir aux critères de performances, l'utilisateur est alors incité à comparer différentes options, qui peuvent être des scénarios plus ou moins complexes⁴⁵.

⁴⁴ Un tel danger concerne particulièrement les référentiels qui reposent sur un schéma de relations technique-performances global et non encore stabilisé, faisant appel à des chaînes de causalité encore incomplètement élucidées et imprécises. C'est notamment le cas de certains référentiels relatifs à la protection intégrée ou à la biologie des sols.

⁴⁵ Ce dernier cas correspond à l'exemple relatif à la conservation des sols (§ 1.2) alors que celui relatif aux densités de semis du tourmesol (§ 1.1) relève typiquement du mode prescriptif. Le cas relatif à la fertilisation azotée est hybride : prise globalement, la méthode du bilan prévisionnel est nettement prescriptive, mais chacun des référentiels qui y sont inclus sont de type évaluatif : ils débouchent sur des « performances » (fournitures d'azote minéral) qui pourraient être utilisées dans des scénarios de stratégies de gestion de l'azote, et non sur des recommandations.

Encadré 1 : Collection d'exemples de référentiels illustrant les domaines et sous-domaines agronomiques présentés dans le tableau 3

Légende

- (a) : Les chiffres romains correspondent aux exemples présentés dans les § 1.1, 1.2, 1.3 et 1.4, les autres à la liste élargie d'exemples
 (b) et (c) : Domaine et sous domaine agronomiques identifiés par leur code (cf. tableau 3)
 (d) : Cf. § 1 de l'annexe
 (e) : Cf. typologie proposée au tableau 4. En caractère souligné : modalité(s) principale(s) ; non-souligné : modalité(s) complémentaire(s)
 (f) : Cf. liste des méthodes d'acquisition de données énoncées dans le tableau 4

N°	Domaine	Sous-Domaine	Sujet	Niveau d'organisation et type de décision (d)	Modèle(s) de connaissance agronomique (e)	Méthode(s) d'acquisition de données (f)	Diffusion/ Année Forme Éditeur
(a)	(b)	(c)					
1	CMV	EPPLE	Faisabilité du soja en région Grand Est selon les caractéristiques spatialisées du climat (sommées de température et risque de stress hydrique) et du sol (RU, Calcaire actif et matériau parental).	Parcelle et Territoire / Stratégique	E (<u>C</u> et <u>D</u>)	2 et 6	Régionale 2022 Cartes Terres Inovia
2	CMV	ASSO	Choisir un mélange d'espèces d'une prairie de longue durée en fonction du mode de valorisation et des conditions pédoclimatiques : intérêts agronomiques (productivité, fixation en azote, ...).	Parcelle / Stratégique	<u>B</u> , C et A	2	Nationale 2022 Tableau et texte AFPF
3	CMV	CI	Choisir les espèces d'un couvert d'interculture en fonction de la durée de l'interculture et de la culture suivante : impact agronomique et écologique.	Parcelle / Stratégique	A	3	Nationale 2020 Tableaux Arvalis
4	CMV	VAR	Choisir une ou plusieurs variétés d'orge d'hiver brassicole ou fourragère en fonction de la destination de la récolte et de la tolérance à la rouille naine. Intérêt économique.	Parcelle / Tactique	<u>B</u> , A et C	2	Nationale 2020 Tableaux Arvalis
5	CMV	VAR	Choisir une ou plusieurs variétés de blé tendre d'hiver, en fonction de la zone de production, de la résistance aux accidents et maladies et de la qualité technologique. Intérêt économique.	Parcelle / Tactique	<u>B</u> , A et C	2	Nationale 2020 Tableaux Arvalis
6	IC	TDS	Travail du sol et culture du maïs : modalités de préparations de terres en fonction des précédents culturaux et des sols : accidents - risques à éviter ; profils culturaux recherchés.	Parcelle / Stratégique	A	3	Nationale 1971 Tableaux BTI Minagri
7	IC	TDS	Intérêt économique des Techniques Culturelles Sans Labour (TCSL) en fonction des caractéristiques pédoclimatiques régionales et du système de production.	Exploitation / Stratégique	<u>D</u> et B	6	Nationale 2008 Tableaux et graphiques Arvalis

N° (a)	Domaine (b)	Sous-Domaine (c)	Sujet	Niveau d'organisation et type de décision (d)	Modèle(s) de connaissance agronomique (e)	Méthode(s) d'acquisition de données (f)	Diffusion/ Année Forme Éditeur
8	IC	TDS	Intérêt économique des TCSL en fonction des caractéristiques du système de production (assolement, dimension, etc.).	Exploitation / Stratégique	B	4	Nationale 2008 Graphiques Arvalis
9	IC	TDS	Choix des outils de travail du sol selon le type d'opération concerné et la texture du sol.	Parcelle et exploitation / Tactique et stratégique	C, A et B	2 et 3	Nationale 2010 Tableaux Arvalis
10	IC	TDS	Performance des semoirs à céréales (taux de levée des cultures et adventices) selon l'état du sol avant semis.	Exploitation / Stratégique	B	2	Nationale 2009 Tableaux Arvalis
11	IC	TDS	Surveiller régulièrement la structure du sol, proposition d'une méthode.	Parcelle / Stratégique	C	3	Nationale 2021 Tableaux Arvalis
1	IC	DDS	Conseil de densité de semis pour la culture du tournesol selon les conditions de levée et le degré de contrainte hydrique prévisible. Cf. texte § 1.1	Parcelle / Tactique	E (C et D)	2 et 6	Nationale 2020 Tableau Terres Inovia
12	FERT	COMPP	Teneurs en azote des organes végétaux récoltés des cultures de plein champ, des principaux fourrages et de la vigne, pour le calcul de différents bilans azotés post récolte.	Parcelle / Stratégique	B	4 et 8	Nationale 2013 Tables Comifer
13	FERT	COMPP	Teneurs en P-K-Mg par unité de récolte des cultures de plein champ et des principaux fourrages, pour le calcul des bilans culturaux F-E "fumure-exportation".	Parcelle / Stratégique	B	3 et 8	Nationale 2019 Tables Comifer
14	FERT	MFERT	Quantification des effets azote, phosphore, potassium et magnésium des apports de différents types d'engrais organiques, enfouis ou non, effectués sur une culture réceptrice à une période donnée.	Parcelle / Tactique	C	2 et 4	Internationale 2020 Outil en ligne Arvalis
15	FERT	MFERT	Quantification de la fourniture d'azote par une matière fertilisante d'origine organique pour une culture selon le type de PRO et la période d'apport, pour la méthode du bilan prévisionnel (coefficient KeqN).	Parcelle / Tactique	C	8	Nationale 2013 Tables Comifer
16	FERT	AZOTE	Quantification de la minéralisation de l'azote du sol utilisable par une culture en considérant le système de culture, le sol et le climat de la parcelle pour la méthode du bilan prévisionnel (méthode Sol-AID).	Parcelle / Tactique	C	2	Régionale 2020 Outil en ligne CRA-Br

N°	Domaine	Sous-Domaine	Sujet	Niveau d'organisation et type de décision	Modèle(s) de connaissance agronomique	Méthode(s) d'acquisition de données	Diffusion/ Année Forme Éditeur
(a)	(b)	(c)		(d)	(e)	(f)	
17	FERT	AZOTE	Méthode pour le calcul de la dose d'azote minéral à apporter aux cultures par la méthode du bilan prévisionnel pour un objectif de rendement, selon les caractéristiques du sol, du climat, les apports organiques, les précédents.	Parcelle Tactique	/ C	8	Nationale 2013 Équations et tables Comifer
III	FERT	AZOTE	Calcul de la dose d'azote minéral à apporter à une culture de maïs en plaine d'Alsace par la méthode du bilan prévisionnel selon la localisation, le type de sol, le précédent et les apports de PRO. Cf. texte § 1.3.	Parcelle Tactique	/ C	2 et 5	Régionale 2015 Tables CRA-AI
18	FERT	PKMG	Méthode pour le calcul de la fertilisation minérale P K Mg des grandes cultures et des cultures fourragères selon la teneur du sol, l'exigence de la culture, la gestion des résidus et le passé récent de fertilisation.	Parcelle Tactique	/ C	2 et 8	Nationale 2019 Équations et tables Comifer
19	FERT	OLI	Seuils de carence (apports correctifs nécessaires) et de toxicité (chaulage ou éviction des cultures sensibles) en fonction de l'espèce végétale et des caractéristiques du sol (acidité, teneur en calcaire, texture, CEC etc.).	Parcelle Stratégique	/ C et B	8	Nationale 1989 Textes Inra
20	FERT	ORG	Exporter ou non des pailles en Picardie selon le système de culture (cultures et restitutions organiques), le type de sol et sa teneur en Corg initiale, en conservant ou améliorant le stock de Corg du sol.	Parcelle Stratégique	/ D (modèle AMG)	6	Régionale 2008 Tables Agro-Transfert R&T
21	FERT	ORG	Diagnostic d'effets moyen et long terme d'un SdC (cultures, productivité, restitutions organiques) sur l'évolution de la teneur en Corg du sol, selon le type de sol et sa teneur en Corg initiale et le climat.	Parcelle Stratégique	/ D (modèle AMG)	5 et 6	Nationale 2014 Outil en ligne Agro-Transfert R&T
IV	FERT	CALC	Recommandations pour l'entretien calcique des sols de limons en Bresse selon le diagnostic d'état calcique et l'hydromorphie du sol. Cf. texte § 1.4	Parcelle Stratégique	/ C, B et A	5 et 8	Régionale 1990 Tables CA 71
22	FERT	CALC	Chaulage : stratégies de redressement - entretien pour 3 types de prairies permanentes caractérisées par leur fonction et leur conduite, selon l'acidité des sols (en 4 classes).	Parcelle Stratégique	/ C, A et B	8 et 5	Nationale 2009 Tableau COMIFER
23	FERT	BIO	Orienter les pratiques (travail du sol, apport de PRO, ...) à partir d'un diagnostic de fonctionnement biologique du sol établi sur des indicateurs relatifs à la nématofaune, selon le système de production.	Parcelle / Stratégique	/ C	5	Nationale 2023 Référentiel privé ELISOL
24	FERT	BIO	Orienter les pratiques culturales en GC (apport de PRO, couverts d'interculture, travail du sol, rotation, système de culture) à partir d'un diagnostic du fonctionnement biologique du sol établi sur divers bioindicateurs interprétés selon la texture du sol.	Parcelle / Stratégique	/ C	5	Nationale 2022 Tableaux CASDAR Microbioterre

N°	Domaine	Sous-Domaine	Sujet	Niveau d'organisation et type de décision (d)	Modèle(s) de connaissance agronomique (e)	Méthode(s) d'acquisition de données (f)	Diffusion/ Année Forme Éditeur
(a)	(b)	(c)					
25	PPSP	ADV	Le labour et la rotation, deux leviers à appliquer régulièrement pour le contrôle des adventices.	Parcelle / Stratégique	C	1 (longue durée)	Nationale 2020 Tableaux Arvalis
26	PPSP	MALAD	Protection intégrée contre la fusariose de l'épi (céréales) : prise en compte du précédent, de la gestion des résidus, de la sensibilité variétale, de la pluviométrie autour de la floraison pour décision du traitement.	Parcelle / Tactique	C	4	Nationale 2020 Tableaux Arvalis
27	PPSP	MALAD	Combinaison du levier variétal et la protection chimique contre le mildiou de la pomme de terre à partir de l'évaluation de la sensibilité des variétés en conditions contrôlées.	Parcelle / Tactique	A	1	Nationale 2022 Tableaux Arvalis
28	PPSP	ADV	Recommandations techniques pour gérer le risque ambrosie sur tournesol et soja en situation de résistance aux inhibiteurs de l'ALS, en décalant la date de semis et en pratiquant le binage.	Parcelle / Tactique	C	5	Nationale 2018 Tableaux TI et Arvalis
29	PPSP	RAVAG	Recommandations techniques pour gérer le risque chrysomèle sur le maïs grain et le maïs fourrage selon le nombre de captures d'adultes sur pièges observé au cours de l'année précédente.	Parcelle / Tactique et Stratégique	C	4	Nationale 2023 Tableaux Arvalis
30	SDC	ECOPP	Systèmes de culture économes et performants (SCEP), situés dans leur contexte pédoclimatique régional et dans le système de production dont ils font partie (différents ateliers présents, assolement, etc.).	Sole occupée / par un SdC / Stratégique	E (A et B)	4	Nationale 2015 Fiches par cas-types d'exploitations CAN Dephy
31	SDC	ECOPP	Trajectoires de réduction des pesticides (leviers mis en œuvre et évolution des IFT), situées dans le contexte pédoclimatique régional et le système de production auquel appartient le Système de culture économe et performant (SCEP) correspondant.	Sole occupée / par un SdC / Stratégique	A et B	4	Nationale 2018 Fiches par cas-types d'exploitations CAN Dephy
32	SDC	DEROB	Conditions de réussite du tournesol en culture dérobée : choix variétal, date et densité de semis en fonction du contexte macro-régional (zone climatique).	Parcelle / Stratégique et tactique	A et B	5	Nationale 2009 Tableau et texte Terres Inovia
33	SDC	INTERC	Choix des cultures intermédiaires en fonction des périodes de semis et des cultures suivantes.	Parcelle / Stratégique et tactique	C, A et B	2	Nationale 2011 Tableaux Arvalis
34	SDC	INTERC	Estimation des restitutions en azote, phosphore, potassium, ... pour dix espèces majoritaires de culture intermédiaire à la culture suivante, en fonction de la gestion du couvert (méthode MERCI).	Parcelle / Tactique	E (C et D)	2 et 6 (modèle STICS)	Nationale 2021 Tableaux Arvalis et CRA-NA

N°	Domaine	Sous-Domaine	Sujet	Niveau d'organisation et type de décision	Modèle(s) de connaissance agronomique	Méthode(s) d'acquisition de données	Diffusion/ Année Forme Éditeur
(a)	(b)	(c)		(d)	(e)	(f)	
35	SDC	INTERC	Choix des outils de déchaumage : évaluation selon différents objectifs, en fonction du type d'itinéraire technique (labour ou non-labour).	Exploitation / Stratégique	C	1	Nationale 2008 Tableaux Arvalis
36	SYSF	POTPP	Évaluation de la production des prairies en région allaitante, en fonction de la variabilité saisonnière et interannuelle du climat, par type de sol et pour 2 niveaux d'azote.	Parcelle / Stratégique	D (STICS prairie)	4 et 6	Régionale 2004 Tableaux CA 71
37	SYSF	POTPP	Prairies permanentes : pour valoriser leur diversité, typologie (production et flore, par saison) en fonction des milieux (climat, altitude) et des pratiques (mode d'exploitation, fertilisation).	Parcelle / Stratégique	C (modèle e-FLORA-sys)	5	Nationale 2011 Tableaux Idele
38	SYSF	GESPAT	En élevage allaitant, optimiser le pilotage du pâturage au printemps en relation avec les objectifs de l'éleveur (qualité, sécurité, robustesse /aléas climatiques) et des contraintes et atouts de l'exploitation.	Exploitation / Stratégique	C	4	Régionale 2009 Tableau et texte CA 71
39	AEMO	JDISP	Nombre de jours disponibles en Picardie (moyennes décadaires selon le type de sol et le type d'opération).	Exploitation et/ou parcelle / Stratégique	A	3 et 4	Régionale 1996 Tableaux Agro-Transfert R&T
40	AEMO	CCC	Coûts de production, coûts de revient et seuils de commercialisation des principales cultures en fonction des itinéraires techniques (région Ile de France).	Exploitation / Stratégique	A et B	3 et 4	Régionale 2020 Fiches par culture Caerif, AS 77, CA Région IdF
41	AEMO	CCC	Rentabilité comparée du tournesol et du soja en culture dérobée : charges opérationnelles et marges brutes en fonction du prix de la graine	Exploitation / Stratégique	B et A	3 et 4	Nationale 2009 Tableaux TI et Arvalis
II	SOL	EROS	Ratio de perte en terre entre une culture et une jachère nue (facteur C de l'USLE). Cf. texte § 1.2	Parcelle / Stratégique	C	2 et 5	Internationale 1965 Tableaux U.S. Department of Agriculture
42	SOL	DRAIN	Intérêt du drainage en fonction des jours disponibles en période critique : caractérisation des paramètres (réservoir du sol, aptitude /ressuage, exigences selon opérations) en sols hydromorphes.	Parcelle / Stratégique	D (modèle mécaniste intégré à OTELO)	4 et 6	Régionale 1995 Tableaux CA 71 et CRA-Bo

N°	Domaine	Sous-Domaine	Sujet	Niveau d'organisation et type de décision (d)	Modèle(s) de connaissance agronomique (e)	Méthode(s) d'acquisition de données (f)	Diffusion/ Année Forme Éditeur
(a)	(b)	(c)					
43	EAU	IRRIG	Estimation du réservoir en eau du sol utilisable par les cultures selon les caractéristiques mesurables du sol et l'enracinement de la culture.	Parcelle / Stratégique	C	8	Nationale 2022 Équations, tables et protocoles Arvalis
44	EAU	IRRIG	Sensibilité des différents systèmes d'irrigation aux pertes en eau selon leur origine et le contexte (conditions pédoclimatiques locales, stade de la culture, conditions de mise en œuvre, pratiques culturales).	Parcelle / Stratégique et tactique	A	3 et 8	Nationale 2022 Tableau Afeid
45	EAU	IRRIG	Estimation des besoins décennaux moyens et annuels en eau d'irrigation pour grandes cultures et cultures fourragères, légumières et fruitières, selon le RU du sol, la localisation géographique et le profil d'année climatique.	Parcelle / Tactique et Stratégique	D	6	Régionale 2018 Tables et équations BRL
46	EAU	IRRIG	Valeurs des coefficients culturaux de grandes cultures, cultures fourragères, légumières et fruitières, pour le calcul de leurs besoins en eau selon le stade physiologique.	Parcelle / Tactique et Stratégique	C	8	Régionale 2023 Tables en ligne Cirame
47	EAU	IRRIG	Estimation des besoins mensuels et annuels en eau d'irrigation pour grandes cultures, cultures fourragères, légumières et fruitières, selon la localisation géographique, le RU sur 1 m, la profondeur d'enracinement, l'enherbement et le profil d'année climatique.	Parcelle / Tactique et Stratégique	D	6	Régionale 2014 Tableaux CRA-Paca
48	ENV	AIR	Diagnostic de risque de pertes ammoniacales lors des apports d'engrais minéraux selon le sol, le climat et la couverture végétale et efficacité des leviers actionnables pour les éviter.	Parcelle / Tactique	C	8	Nationale 2022 Tables Comifer et RMT Bouclage
49	ENV	AZOTE	Diagnostic des pertes en azote (vers les eaux et l'atmosphère) à l'échelle du SdC selon le sol, le climat et les pratiques, pour en identifier l'origine, les leviers d'action et évaluer à priori l'impact de nouvelles pratiques.	Parcelle / Tactique et Stratégique	D (simulateur SYST'N)	8 et 7	Nationale 2012 Outil en ligne Inra et RMT F&E
50	ENV	NO ₃	Cultures intermédiaires piège à nitrates (CIPAN) : choix des espèces selon efficacité et arrière-effet N en fonction de la date de destruction du couvert et de la période d'implantation de la culture suivante.	Parcelle / Stratégique et/ou tactique	C	2	Nationale 2009 Tableau Arvalis
51	ENV	NO ₃	Cultures intermédiaires piège à nitrates (CIPAN) : possibilités d'implantation et modalités recommandées en fonction des dates de semis, des caractéristiques pédoclimatiques régionales et des catégories d'espèces végétales.	Parcelle / Stratégique et/ou tactique	D (modèles STICS et SIMPLE)	6	Nationale 2012 Tableaux, graphiques, cartes Inra

N°	Domaine	Sous-Domaine	Sujet	Niveau d'organisation et type de décision	Modèle(s) de connaissance agronomique	Méthode(s) d'acquisition de données	Diffusion/ Année Forme Éditeur
(a)	(b)	(c)		(d)	(e)	(f)	
52	ENV	NO ₃	Adapter la stratégie culturale au type de sol : grille de risques relatifs au potentiel de pertes en nitrates en fonction des terrains et systèmes de culture.	Sole occupée par un SdC / Stratégique	D (modèle AGRIFLUX)	1 et 6	Régionale 2006 Tableaux CA 71
53	ENV	PPS	Valeurs des paramètres de comportement environnemental de substances actives phytosanitaires (Koc, DT50, Kh, Pv, Sw, Kow, ...).	Parcelle et Territoire / Tactique et Stratégique	C	8	Internationale 2016 Outil en ligne University of Hertfordshire
54	ENV	PPS	Valeurs de paramètres de comportement environnemental de 498 substances actives phytosanitaires (Koc, DT50, Kh, Pv, Sw, Kow) pour un outil de diagnostic agro-environnemental.	Parcelle et territoire / Tactique et Stratégique	C	8	Internationale 2023 Table Inrae, Uni. Lorraine, CRA-GE, Arvalis
55	ENV	ETM	Valeurs limites réglementaires de teneurs en éléments traces métalliques dans les sols pour l'épandage de MIATE (Matières d'Intérêt Agronomique issue du Traitement des Eaux).	Parcelle / Stratégique	B	8	Nationale 1998 Tableau JORF
56	ENV	ETM	Seuils de détection d'anomalies de teneurs dans les sols pour une série d'éléments traces métalliques (Cd, Co, Cr, Cu, Mo, Ni, Pb, Th, Zn).	Parcelle / Stratégique	B	4 et 6	Nationale 2018 Outil en ligne Gis Sol
57	ENV	W&GES	Facteurs d'émission de gaz à effet de serre (GES) et consommations d'énergie par unités de surface en fonction des activités.	Exploitation / Stratégique	D, C et B	Tous (selon les GES et activités)	Nationale 2013 Tableaux, équations Ademe
58	ENV	W&GES	Facteurs d'émission de gaz à effet de serre (GES) et consommations d'énergie par unités de surface en fonction des activités présentes sur un espace de gestion et des caractéristiques pédoclimatiques de cet espace.	Tous niveaux d'organisation spatiale / Stratégique	D, C et B	Tous (selon les GES et activités)	Nationale 2020 Outil en ligne Tableaux, équations Ademe et Solagro
59	ENV	COSOL	Stocks et flux de carbone sur un espace de gestion en fonction de l'occupation des sols, des pratiques agricoles et des caractéristiques pédoclimatiques.	Tous niveaux d'organisation spatiale / Stratégique	D, C et B	4 et 6	Nationale 2018 2022 Outil en ligne tableaux, équations Ademe
60	ENV	IMPAC	Facteurs d'impact par produits (analyse multicritère selon la méthodologie ACV), en fonction de grandes catégories d'itinéraires techniques.	Filière de production / Stratégique	D, C et B	Tous (selon les impacts considérés)	Nationale 2022 Tableaux Ademe et Inrae

N°	Domaine	Sous-Domaine	Sujet	Niveau d'organisation et type de décision	Modèle(s) de connaissance agronomique	Méthode(s) d'acquisition de données	Diffusion/ Année Forme Éditeur
(a)	(b)	(c)		(d)	(e)	(f)	
61	QUAL	TOX	Grille d'évaluation du risque DON (désoxynivalenol) sur blé tendre et recommandations techniques correspondantes, en fonction du système de culture (précédents culturaux, labour ou non) et de la sensibilité variétale.	Parcelle / Stratégique et tactique	B, A et C	2 et 4	Nationale 2009 Tableau Arvalis

Abréviations de l'encadré 1

Ademe	Agence de la transition écologique (antérieurement Agence de l'environnement et de la maîtrise de l'énergie)
Afeid	Association française pour l'eau agricole, une irrigation et un drainage durables
AFPP	Association Francophone pour les Prairies et les Fourrages (depuis 2020, anciennement Association Française pour la Production Fourragère)
Agro-Transfert R&T	Agro-Transfert Ressources et Territoires
AS 77	Accompagnement Stratégie Seine-et-Marne
BTI Minagri	Bulletin d'information technique du Ministère de l'Agriculture
BRL	Groupe Bas-Rhône-Languedoc
CA 71	Chambre d'Agriculture de Saône et Loire
Caerif	Centre agricole d'économie rurale d'Île de France
CAN Dephy	Cellule d'Animation Nationale du réseau DEPHY
CA Région IdF	Chambre d'Agriculture de Région Île de France
CIRAME	Centre d'Information Régional Agrométéorologique en région PACA
COMIFER	Comité Français d'Etude et de Développement de la Fertilisation Raisonnée
CRA-Al	Chambre d'Agriculture Région Alsace
CRA-Bo	Chambre Régionale d'Agriculture de Bourgogne
CRA-Br	Chambre Régionale d'Agriculture de Bretagne
CRA-GE	Chambre Régionale d'Agriculture Grand-Est
CRA-NA	Chambre Régionale d'Agriculture de Nouvelle-Aquitaine
CRA-PACA	Chambre Régionale d'Agriculture de Provence-Alpes-Côte d'Azur
Gis Sol	Groupement d'Intérêt Scientifique Sol
Idele	Institut de l'élevage
Inra / Inrae	Institut national de la recherche pour l'agriculture, l'alimentation et l'environnement
JORF	Journal Officiel de la République Française
PRO	Produits Résiduaux Organiques
RMT F&E	Réseau Mixte Technologique « Fertilisation et Environnement » (aujourd'hui RMT Bouclage)

Bibliographie de l'encadré 1, collection d'exemples de références et référentiels

NB : cette bibliographie est présentée dans l'ordre des numéros de la colonne a de l'encadré 1

- 1 Baillet A., 2022. *Etude du bassin de production de soja en Grand Est : volet agronomique*. Terres Inovia. 45 p. https://grandest.chambre-agriculture.fr/fileadmin/user_upload/Grand-Est/049_Inst-Acal/RUBR-productions-agricoles/ARPEEGE/Etude_du_bassin_de_production_du_soja_en_Grand_Est_ARPEEGE-202206.pdf
- 2 Collectif, 2022. *Mélanges de semences pour prairie de longue durée en France – préconisations agronomiques*, 3ème ed., *Guides techniques*. AFFF. 12 p.
- 3 Labreuche J. et al., 2020. Couverts d'interculture : comment choisir des espèces adaptées. *Perspectives Agricoles*, 479, p. 17-21.
- 4 Chaillet I., 2020. Orges de printemps : les variétés préférées récentes sont plus tolérantes aux maladies. *Perspectives Agricoles*, 483, p. 19-22
- 5 Du Cheyron P., Streiff A. 2020. Variétés de blé tendre cultivées en France. *Perspectives Agricoles*, 477, p. 33-73
- 6 Dalleine E., Récamier A., Sebillotte M., 1971. Travail du sol et culture de maïs. N° spécial BTI 264-265, p. 889-920
- 7 Crochet F., Nicoletti J.-P., Bousquet N., 2008. Techniques sans labour. Simplification du travail du sol : un intérêt économique variable d'une exploitation à l'autre. *Perspectives agricoles* 344, p. 22-25
- 8 Deton C., Labreuche J., 2008. Techniques sans labour. Sur le terrain : 31 exploitations enquêtées. *Perspectives agricoles* 344, p. 26-30
- 9 ARVALIS, 2010. *Choisir ses outils de travail du sol*. Arvalis-Institut du végétal, Paris, 180 p.
- 10 Labreuche J., Dosne J., Brun D., Duyme F., 2009. Semoirs céréales : des techniques de semis aux performances contrastées. *Perspectives agricoles* 353, p. 32-40
- I Casadebaig, P., Mestries, E., Debaeke, P., 2016. A model-based approach to assist variety evaluation in sunflower crop. *European Journal of Agronomy*, 81, pp.92-105. ([10.1016/j.eja.2016.09.001](https://doi.org/10.1016/j.eja.2016.09.001))
- 11 Deschamps T. Metais P., 2020. Structure du sol : comment régénérer un sol tassé ? *Perspectives Agricoles*, 480. <https://www.perspectives-agricoles.com/conduite-de-cultures/structure-du-sol-comment-regenerer-un-sol-tasse>
- 12 Collectif, 2013. *Teneurs en azote des organes végétaux récoltés pour les cultures de plein champ, les principaux fourrages et la vigne - tableau de référence 2013*. COMIFER, 4 p.
- 13 Collectif, 2019. Teneurs en P, K et Mg des organes végétaux récoltés pour les cultures de plein champ et les principaux fourrages, in : *La fertilisation P-K-Mg, les bases du raisonnement*. COMIFER, p. 29-31.
- 14 ARVALIS, 2020. *Fertiliser avec des produits organiques ou biosourcés*. <https://fertiorga.arvalis-infos.fr/FR>
- 15 Collectif, 2013. *Tableau des coefficients d'équivalence azote (KeqN) de divers exemple de produits résiduels organiques (PRO) in : Calcul de la fertilisation azotée, guide méthodologique pour l'établissement des prescriptions locales, cultures annuelles et prairies*, 3rd ed. COMIFER. https://comifer.asso.fr/wp-content/uploads/2015/03/Tableau-keq_brochure2013.pdf
- 16 Lambert Y., Beff L., Morvan T., 2020. Sol-AID : un outil pour mieux prédire la minéralisation de l'azote du sol. *Terra*, 25/09/2020, p. 32-33 [Art_2_TERRA_25-09-2020.pdf](https://www.terra.fr/Art_2_TERRA_25-09-2020.pdf) (solaid.fr)
- 17 Collectif, 2013. *Calcul de la fertilisation azotée, guide méthodologique pour l'établissement des prescriptions locales, cultures annuelles et prairies*, 3ème ed. COMIFER. 159 p.
- III Collectif, 2015. *Guide technique AGRI-MIEUX fertilisation des grandes cultures*. Chambre d'agriculture Région Alsace, 36 p.
- 18 Denoroy P., Jordan-Meille L., Sagot S., 2019. *La fertilisation P-K-Mg, les bases du raisonnement*. COMIFER. 40 p.
- 19 Coïc Y., Coppenet M., 1989. *Les oligo-éléments en agriculture et élevage*. INRA, Paris, 136 p.
- 20 Collectif, 2008. *Pouvez-vous exporter vos pailles ? Une aide à la décision en région Picardie*. FRCA Picardie – AGRO-TRANSFERT – ARVALIS – INRA – LDAR – Chambres d'agriculture de Picardie. 6 p.
- 21 Bouthier A., Duparque A., Mary B., Sagot S., Trochard R., Levert M., Houot S., Damay N., Denoroy P., Dinh J.-L., 2014. Adaptation et mise en œuvre 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, p.125-139.
- IV Kockmann F., 1990. *Chaulage et fertilité en limons battants hydromorphes. Dossier technique à l'attention des conseillers*. Chambre d'agriculture de Saône et Loire, avec le concours du CEREF ISARA-32p.
- 22 COMIFER groupe Chaulage (2009). *Cas des prairies de longue durée in Le Chaulage, des bases pour le raisonner*, version 2, p79-82.
- 23 Plaquette ELISOL environnement - l'expertise biologique de vos sols. <https://www.elisol.fr/Dco-Plaquette-ELISOL-V4.pdf> consulté le 05/07/2023
- 24 Collectif CASDAR Microbiotierre, 2022. *Microbiotierre - Guide d'interprétation à l'analyse des bioindicateurs*. 40 p.

- 25 Labreuche J., Cabeza-Orcel P., et Alletru C. 2020. Le labour contrôle mieux l'enherbement. *Perspectives Agricoles*, 474, p. 22-25.
- 26 Valade R., Maufrais J. Y., 2020. Fusariose de l'épi : mieux protéger contre l'ensemble du complexe. *Perspectives Agricoles*, 478, p. 58-60
- 27 El Hage F., Gaucher D, 2022. <https://www.perspectives-agricoles.com/conduite-de-cultures/gestion-du-mildiou-le-levier-varietal-se-marie-bien-avec-une-protection>
- 28 Duroueix F., Vuillemin F., 2018. Désherbage du tournesol et du soja : contre l'ambrosie trois leviers complémentaires. *Perspectives Agricoles*, 451, p. 24-26.
- 29 Thibord J.B., 2023. Chrysomèle du maïs : des recommandations de gestion adaptées selon l'abondance de la population. *Perspectives Agricoles*, 508, p. 22-26
- 30 CAN DEPHY, 2015. Réseau Dephy Fermes. Systèmes économes et performants. <https://ecophytopic.fr/dephey/concevoir-son-systeme/reseau-dephey-ferme-systemes-de-culture-econome-et-performant-scep>
- 31 CAN Dephy, 2018. Réseau Dephy Fermes. Fiches trajectoire. <https://ecophytopic.fr/pic/concevoir-son-systeme/reseau-dephey-ferme-fiches-trajectoire>
- 32 Lecomte V., 2009. Tournesol et soja : réussir une culture dérobée. *Perspectives agricoles* 357, p. 93-95
- 33 Besnard A., Morin P., Duval R., Hopquin B., Lieven J., Straëbler M., 2011. Un choix d'espèces de plus en plus large. In : *Cultures intermédiaires. Impacts et conduite*. Arvalis-Institut du végétal, Paris, p. 137-161
- 34 Rayon B., Vericel G., Cabeza-Orcel P., Minette S., 2021. Méthode MERCI : calculer les éléments fertilisants restitués par les couverts. *Perspectives Agricoles*, 486, p. 16-19.
- 35 Brun D., 2008. Dossier déchaumage. Caractéristiques mécaniques : bien choisir son outil. *Perspectives agricoles*, 347, p.26-29
- 36 Collectif, 2004. *Spécial prairies permanentes, Cahier agro-climatique*, n°10, Chambre d'Agriculture de Saône-et-Loire - Météo France, 34 p.
- 37 Launay F., Baumont R., Plantureux S., Farrie J.P., Michaud A., Pottier E., 2011. *Prairies permanentes : des références pour valoriser leur diversité*, Institut de l'Élevage, Paris ; 128 p., ISBN 978-2-36343-000-7.
- 38 Kockmann F., Granger S., Lemasson C., Simoens C., Duru M., 2000 . Gestion du pâturage au printemps en système bovin allaitant : diversité des pratiques en Saône et Loire. *Fourrages*, 198, p. 221-226.
- 39 Mousset J., 1996. *Mécagro. Conseil en agroéquipement dans les exploitations de grandes cultures (Manuel 3)*. Le Biopôle végétal section Agrotransfert, Estrées-Mons, 338 p.
- 40 Collectif, 2020. *Assolement et stratégie. Itinéraires techniques et seuils de commercialisation prévisionnels*. Centre agricole d'économie rurale d'Île de France, Accompagnement Stratégie 77, Chambre d'agriculture de région Île de France 48 p.
- 41 Lecomte V., 2009. Tournesol et soja : réussir une culture dérobée. *Perspectives agricoles* 357, p. 93-95
- 42 Wischmeier W.H., Smith D.H., 1965. *Predicting rainfall erosion losses from cropland east of the Rocky Mountains. Guide for selection of practices for soil and water conservation*. Agriculture handbook N° 282. Agricultural Research Service, USDA, in cooperation with Purdue Agricultural Experimental Station, Washington D.C., 47 p.
- 43 Guillot C., Moret P., Bouillot J-F., Lalanne E., Kockmann, F., 1995. *Faut-il continuer à drainer ? Hydromorphie, Jours Disponibles et Organisation du travail en Bourgogne. Opération Secteur de Références Drainage* -Chambre d'agriculture de Bourgogne et Chambre d'agriculture de Saône et Loire- 27 p.
- 43 Bouthier A., Scheurer O., Seger M., Lagacherie P., Beaudoin N., Deschamps T., Sauter J., Fort J.-L., Cousin I., 2022. *Réservoir en eau du sol utilisable par les cultures*. Editions Arvalis.102 p.
- 44 Wittling C., Ruelle P. (coord.), 2022. *Guide pratique de l'irrigation (4ème éd.)*. Editions Quae, Versailles, 352 p.
- 45 BRL, 2018. *Mémento Irrigation*. BRL, Nîmes. 88 p.
- 46 <http://www.agrometeo.fr/irrigation.asp>
- 47 Piton N., Baury C., Beillard J-L., Boyer I., Brun M., Cauvin G., Coutagne E., Laroche B., Macé C., Martinez A.-M., Moynier H., Muscat A. 2014. *Référentiel des besoins en eau d'irrigation des productions agricoles de Provence Alpes Côte d'Azur*. Chambre Régionale d'Agriculture PACA. 141 p. <http://www.agrometeo.fr/fondoc/Livret%20BD.pdf>
- 48 Collectif, 2022. Note sur l'amélioration des pratiques en vue de limiter les risques de pertes d'efficacité des apports azotés minéraux. COMIFER et RMT Bouclage. 9 p.
- 49 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, p.59-70.
- 50 Cohan J.-P., Castillon P., 2009. Dossier couverts végétaux. Effets sur le stock d'azote minéral dans le sol : aptitudes à piéger le nitrate et à contribuer à l'alimentation azotée de la culture suivante. *Perspectives Agricoles* 357, p. 30-36

- 51 Justes É., Beaudoin N., Bertuzzi P., Charles R., Constantin J., Dürr C., Hermon C., Joannon A., Le Bas C., Mary B., Mignolet C., Montfort F., Ruiz L., Sarthou J.P., Souchère V., Tournebise J., Savini I., Réchauchère O., 2012. *Les cultures intermédiaires pour une production agricole durable*, Collection Matière à débattre et à décider, Quæ, Versailles, France, 112 p.
- 52 Novak S., Kockmann F., Villard A., Banton O., Comte J-C., 2006. Adapter la stratégie culturale au type de sol. *Perspectives Agricoles* 321, p. 14-17
- 53 Lewis K.A., Tziliavakis J., Warner D. and Green, A., 2016. An international database for pesticide risk assessments and management. *Human and Ecological Risk Assessment : An International Journal*, 22(4), p. 1050-1064. <https://doi.org/10.1080/10807039.2015.1133242>
- 54 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* 870, <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.161000>
- 55 Arrêté du 8 janvier 1998 fixant les prescriptions techniques applicables aux épandages de boues sur les sols agricoles, JORF 26, p.1563-1571 (NOR : ATEE9760538A)
- 56 Saby N., Villanneau E., Toutain B., Arrouays D., 2018. Seuils de détection d'anomalies pour une série d'éléments traces métalliques (RMQS). <https://doi.org/10.15454/UEZXBY>
- 57 Ademe 2013. *Dia'terre®*, synthèse du guide de la méthode, 70 p.
- 58 Ademe et Solagro, 2020. *CLIMAGRI : un outil d'aide à la décision pour l'agriculture et la forêt à l'échelle des territoires*. Guide méthodologique. Ademe, 176 p.
- 59 <https://docs.datagir.ademe.fr/documentation-aldoinroduction/sources>
- 60 ADEME et INRAE, 2022. *Agribalyse® - Version 3.0. L'évaluation environnementale des produits agricoles et alimentaires*. Guide de l'utilisateur. Ademe, Inrae, 23 p.
- 61 Maumené C., Du Cheyron P., 2009. Dossier variétés de blé tendre. Protection des cultures : miser davantage sur la résistance variétale. *Perspectives agricoles* 356, p.28-32



ARTICLE

Quels indicateurs pour l'évaluation des systèmes agricoles en transition agroécologique ?

Christian Bockstaller *, Aude Alaphilippe **, Frédérique Angevin ***

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

** INRAE, UERI, Domaine de Goheron 26320 Saint-Marcel-Lès-Valence

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

Email contact auteurs : christian.bockstaller@inrae.fr

Résumé

La montée des préoccupations environnementales et, plus généralement, de durabilité autour de l'intensification de l'agriculture, a conduit à l'émergence de nouvelles formes d'agriculture qui s'inscrivent notamment dans le paradigme de l'agroécologie. La phase de transition vers l'agroécologie nécessite une évaluation des systèmes agricoles à la fois pour un diagnostic de la situation de départ, des changements des états lors de la transition, et des cibles à atteindre à l'issue de la transition, pour éventuellement proposer des réajustements de la trajectoire. Dans cet article, nous présentons un cadre conceptuel basé sur une chaîne causale, destinée à catégoriser les indicateurs évaluant les impacts environnementaux et les services écosystémiques, en le positionnant par rapport à d'autres typologies. Ce cadre sera complété par des exemples de méthodes et d'indicateurs, développés pour évaluer des systèmes agroécologiques, globalement ou sur certains aspects spécifiques, pour en illustrer la diversité, sans viser une revue exhaustive. Ces exemples pourront servir de point de départ au développement d'une nouvelle méthode comprenant des indicateurs plus élaborés et en intégrant le concept de service écosystémique.

Mots clés : agroécologie, service écosystémique, évaluation multicritère, cadre conceptuel, chaîne causale, propriété systémique

Abstract

The growing concern for environmental, and more generally sustainability issues with regard to agriculture intensification, has led to the emergence of new agricultural models within the paradigm of agroecology. This transition towards agriculture models based on agroecology requires an assessment of farming systems, either for a diagnosis of the starting situation or of the changes caused by the transition, to modify its path if necessary. In this article we present a conceptual framework based on a causal chain to categorize indicators assessing environmental impacts and ecosystem services, and position it in relation to other classifications. This framework will be supplemented by examples of methods and indicators developed to assess agroecological systems - globally or on specific aspects - to illustrate their diversity, without aiming for an exhaustive review. These examples could serve as a starting point for the development of a new method incorporating indicators from other approaches as well as the concept of ecosystem services.

Keywords: agroecology, ecosystem service, multicriteria assessment, conceptual framework, causal chain, systemic property

Introduction

La montée des préoccupations environnementales et, plus généralement de durabilité, conjointe de l'intensification des systèmes agricoles a conduit à l'émergence de nouvelles formes d'agriculture. Historiquement, les travaux pionniers sur l'agriculture biologique depuis les années 1920, son extension au cours des dernières décennies (Leroux, 2015), comme le développement de la lutte intégrée depuis les années 60 (Girardin, 1993) sont des exemples emblématiques de cette quête de systèmes agricoles respectueux de l'environnement. Plus récemment, l'agroécologie avec ses dimensions scientifique, sociale et technique (Wezel et al., 2009), apparaît comme un nouveau paradigme. Une illustration en est la mise en place du projet agroécologique pour la France du Ministère de l'Agriculture en 2012, focalisé sur la dimension technique du changement de pratiques. Dans la perspective de la durabilité, l'agroécologie repose sur une exigence de la triple performance, économique, sociale et environnementale, et, en même temps, sur des principes faisant appel aux concepts de l'écologie pour répondre à ces objectifs. Pour la définir, dix éléments ou principes, comme, par exemple, la diversité et le recyclage, ont été identifiés dans des travaux de la FAO (Mottet et al., 2020). Au niveau agronomique, elle a été résumée comme la substitution des intrants anthropiques externes par des services écosystémiques (SE) (Therond et al., 2017), c'est-à-dire des processus écologiques ou des éléments de la structure des écosystèmes dont l'homme tire des bénéfices. La pollinisation, la régulation des ravageurs, la protection des sols contre l'érosion, la régulation de l'eau, la fourniture de nutriments sont des exemples de SE régulateurs venant soutenir la production agricole.

Dans tous les cas, il est évident que ce passage au niveau de l'exploitation agricole vers une agriculture basée sur les principes de l'agroécologie ne pourra se faire du jour au lendemain. Une transition est nécessaire et repose sur un changement progressif étape par étape vers un nouvel état désirable qui reste à définir. Cette cible n'est pas une fin en soi et, plus que l'atteinte d'un objectif, c'est le processus de changement incertain et non-prévisible qu'il faut considérer (Prost et al., 2023). Ainsi, très rapidement, une évaluation des systèmes agricoles s'est avérée incontournable, à la fois pour un diagnostic de la situation de départ mais aussi, par la suite, des changements d'état produits par la transition, et des cibles à atteindre à l'issue de cette dernière, pour éventuellement proposer des réajustements de trajectoire. Dans le cadre de la multi-performance, et comme montré aussi par l'approche de la FAO basée sur 10 principes, cette évaluation ne peut qu'être multicritère (Guillou et al., 2013). En effet, il est indispensable de prendre en compte dans l'évaluation les différentes dimensions de la durabilité, principes et performances qui en découlent, sous forme de critères, afin d'identifier les antagonismes mais aussi les synergies entre critères. Et il n'est pas acceptable du point de vue de la durabilité qu'une solution ou plus généralement une transition des systèmes agricoles conduise à améliorer certains critères au prix de la dégradation d'autres critères à un niveau inacceptable pour les acteurs, par rapport à de seuils et normes environnementaux.

Ce besoin d'un cadre conceptuel et méthodologique permettant d'évaluer les systèmes en transition n'est pas nouveau et a conduit précédemment à un foisonnement d'indicateurs et de méthodes d'évaluation. Celles-ci sont définies comme un ensemble plus ou moins structuré d'indicateurs traitant de différents enjeux dans le cadre de la durabilité et de l'agroécologie. Soulé et al. (2021) ont ainsi analysé 262 méthodes d'évaluation de la durabilité au niveau conceptuel et méthodologique, ceci pour la période 1990-2019. Un des constats est la faible prise en compte dans ces méthodes des services écosystémiques (5% des méthodes de la revue), qui sont pourtant une clé de voûte de l'agroécologie. Ainsi, bien que certains auteurs aient parlé d'indicateurs agroécologiques, il apparaît que la majorité ou l'ensemble des indicateurs et méthodes proposés traitaient uniquement des impacts environnementaux (Castoldi et al., 2010 ; Girardin & Bockstaller, 1997).

L'objectif de cet article n'est pas de traiter de ces méthodes « classiques » d'évaluation environnementale mais de faire un point sur les indicateurs et méthodes traitant spécifiquement des principes de l'agroécologie, comme décrits dans Mottet et al. (2020) et des services

écosystémiques qui en sont une composante majeure (Therond et al., 2017). Nous nous centrerons sur les niveaux d'organisation de la parcelle et du système de culture ainsi que de l'exploitation agricole, principalement en grande culture et polyculture-élevage. Nous nous focaliserons sur la dimension agronomique (diversité, synergies, efficacité, recyclage, résilience, et l'économie circulaire) et laisserons de côté les aspects sociaux et de gouvernance (culture et tradition alimentaire, cocréation et partage des connaissances, valeurs sociales et humaines, économie solidaire, gouvernance responsable).

Dans cet article, nous proposons un cadre conceptuel basé sur une chaîne causale pour catégoriser les indicateurs évaluant les impacts environnementaux et les SE, en le positionnant par rapport à d'autres tentatives de catégorisation (Ex : Force motrice/pression/état/impact/réponse, DPSIR de l'Agence Européenne pour l'Environnement ; EEA, 2005). Ce cadre sera complété par une typologie d'indicateurs qui porte sur leur positionnement sur cette chaîne causale et qui prend en compte leur méthode d'obtention (donnée, mesure, modèle). Puis, dans une seconde partie, nous présenterons des exemples de méthodes et indicateurs qui ont été développés pour évaluer des systèmes agroécologiques - de manière globale ou pour certains aspects - pour en illustrer la diversité, sans cependant viser une revue exhaustive.

Un cadre conceptuel et une typologie pour classer les indicateurs environnementaux

Avec le foisonnement des indicateurs observés à la fin des années 90 s'est posée la question de leur caractérisation et classement. Payraudeau et van der Werf (2005) ont fait une distinction simple entre indicateurs « basés sur les moyens », en lien avec les pratiques agricoles, et indicateurs « basés sur les effets » (des pratiques agricoles en termes d'émissions de polluants, de contamination, voire d'impacts sur les organismes vivants). D'autres auteurs ont proposé une classification binaire analogue entre indicateurs « orientés vers l'action » et indicateurs « orientés vers les résultats » (Braband et al., 2003), bien que la notion de résultats puisse porter à confusion et soit vue par certains comme un changement de pratiques (Bonvillain et al., 2020). A l'échelle internationale, les cadres pression/état/réponse (PSR) au niveau de l'OCDE, puis DPSIR, déjà évoqué ci-dessus, ont été repris par de nombreux auteurs, tout en faisant l'objet de nombreuses critiques, notamment pour leur caractère linéaire mais aussi pour des ambiguïtés dans les catégories (Bockstaller et al., 2015). Lang et al. (2007) ont proposé un cadre basé sur l'approche systémique en trois dimensions fonctions/structure/contexte d'un système. Enfin, l'analyse de cycle de vie (ACV), un cadre méthodologique en soi, se centre sur les indicateurs d'impacts, soit « mid-point » (entre les états et les impacts) et « end-point » (impacts finaux ou dégâts). Une autre caractéristique de l'ACV est de considérer le système tout le long du « cycle de vie » d'un produit, d'une activité, avec un système étudié et les systèmes amont (production des intrants) et aval (utilisation du produit et élimination des déchets) pour éviter les transferts d'impacts le long de chaîne de production. L'ACV distingue la technosphère (le système source d'impacts, dans notre cas le système technique de l'exploitation) et l'écosphère (le système affecté, comprenant les différents compartiments environnementaux, avec une ambiguïté sur les sols agricoles, à la fois lieu de production et compartiment touché par les activités humaines).

Face à ce foisonnement de concepts et pour en faciliter l'intercompréhension, nous avons essayé de les intégrer dans la Figure 1 en partant d'une chaîne causale inspirée du cadre DPSIR et de celle de Payraudeau et van der Werf (2005). Cette chaîne comprend des causes (en rouge sur la figure), le système biotechnique (en brun) et les effets (en bleu). Par rapport au cadre précédent, nous avons ajouté des composantes supplémentaires, comme les émissions. Ceci permet de préciser la notion de « pression » dans le cadre DPSIR dans lequel elle englobe à la fois les pratiques et les émissions. Pour lever l'ambiguïté sur le statut du sol, nous avons ajouté l'écosystème agricole qui est lui-même affecté par les pratiques et qui sert d'interface dans un certain nombre de chaînes causales d'impact. En aval (en bleu sur la figure), les sorties comprennent les produits (biens et services) qui sont utilisés devenant sources d'avantages, ainsi que la chaîne causale des impacts pouvant passer par les émissions/changement d'état/impacts. De manière transversale, on peut

aussi évaluer les propriétés systémiques (par exemple : résilience, adaptabilité du système). Ainsi, en fonction du positionnement des indicateurs et de leur objet d'évaluation, il est possible de distinguer des méthodes d'évaluation orientées vers les pratiques ou vers les objectifs, en termes d'impacts et d'avantages, ou encore les propriétés selon différentes approches de la durabilité (Zahm et al., 2015). Cette chaîne causale s'insère dans un niveau d'organisation donné : parcelle/exploitation/territoire (en gris foncé). Ce niveau d'organisation s'insère lui-même dans un système englobant proche (territoire plus grand, région, etc. en gris clair) qui lui-même se situe dans un système global (pays, planète, en gris très clair). Ceci pose des questions sur le changement de niveau d'organisation des indicateurs, question complexe et non traitée dans cet article (Bockstaller et Gilbert, 2019).

Pour chaque composante de ce cadre, des indicateurs peuvent être sélectionnés ou nouvellement développés. Ils peuvent avoir un positionnement différent sur la chaîne causale. Bockstaller et al. (2015) ont distingué :

- les indicateurs de cause qui présentent en général l'avantage d'être mis plus facilement en œuvre (sous réserve que les données soient mises à disposition) mais fournissent une information de faible qualité prédictive sur un effet donné (émission, changement d'état, impacts, etc. ; à droite sur la Figure 1). Ils portent généralement sur des variables causales ou des combinaisons simples de ces variables causales. Celles-ci portent sur les pratiques ou encore les variables pédoclimatiques (à gauche sur la Figure 1).
- les indicateurs d'effet, issus de mesures, comptages, observations, qui sont généralement bien plus difficiles à obtenir mais donnent une « photo plus précise » de l'effet.
- les indicateurs d'effet prédictifs, issus de modèles opérationnels (fondés sur un petit nombre de variables d'entrée accessibles) et des modèles complexes. Ces indicateurs présentent un compromis entre les deux catégories précédentes, en présentant l'avantage de pouvoir relier les causes aux effets et en permettant de mener des évaluations ex ante (a priori).

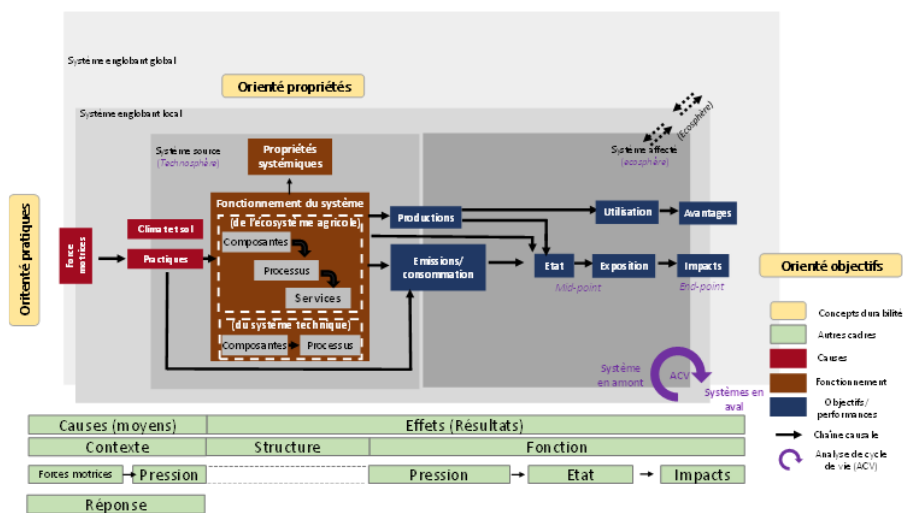


Figure 1 : Cadre conceptuel basé sur chaîne causale développée, intégrant différents cadres conceptuels, méthodologiques et de classification des indicateurs : des approches de la durabilité (jaune), des cadres de classification des indicateurs (vert) avec le niveau d'organisation (cadres gris) ; positionnement de l'analyse de cycle de vie (violet).

Indicateurs et méthodes existantes

Nous avons présenté ci-dessus un cadre conceptuel, basé sur une chaîne causale, qui offre une catégorisation des indicateurs évaluant les impacts environnementaux et les SE. Nous l'avons aussi positionné par rapport à d'autres cadres. En nous y référant, nous présentons différentes méthodes et indicateurs évaluant les systèmes agroécologiques ou en transition de manière globale ou partielle. Nous commencerons cette revue par l'outil pour l'évaluation des performances de l'agroécologie (TAPE) développé par la FAO. Cet outil couvre l'ensemble des aspects de l'agroécologie de manière globale et peu approfondie. L'évaluation de la performance environnementale en fait partie. De manière générale, celle-ci porte sur la réduction des impacts environnementaux (consommation de ressources, contamination des milieux, conservation de la biodiversité) et les services écosystémiques. Nous poursuivons cette revue par différentes méthodes et indicateurs couvrant ces aspects. Nous positionnerons l'ACV et l'analyse énergétique, puis développerons l'évaluation de la biodiversité. La diversification des systèmes étant une voie privilégiée dans la transition agroécologique, nous caractériserons deux méthodes : l'une évaluant ses atouts, selon l'angle des rotations et l'autre traitant de la reconnexion animal-végétal. Un autre article de ce numéro portera spécifiquement sur les systèmes agroforestiers (Alaphilippe et al., dans cette revue). Enfin, nous aborderons l'évaluation agroécologique de systèmes de production alimentaire qui permet d'approfondir certains principes d'agroécologie formulés par la méthode TAPE. Le Tableau 1 fournit une vue d'ensemble de ces méthodes et indicateur avec des descripteurs utilisés couramment dans des études de comparaison (Lairez et al., 2015) et la typologie des indicateurs de Bockstaller et al. (2015). Nous n'avons rien ajouté sur la dimension temporelle car aucune méthode ou indicateur ne traite de manière directe les aspects dynamiques.

Tableau 1 : vue d'ensemble des méthodes revues dans l'article (SE : service écosystémique).

Méthode / indicateur	Public visé	Finalité	Objet	Système	Échelle spatiale	Type d'indicateur
TAPE	Acteurs de l'AE : décideurs, ONG, R&D, etc.	Sensibilisation aux pratiques de l'AE	Évaluation des éléments de l'AE	Divers	Exploitation agricole	Cause Qualitatif/quantitatif
I-DRo	R&D	Conception, conseil	Diversité et SE fournis par la rotation	Grande Culture et poly-culture-élevage	Parcelle	Prédictif Semi quantitatif
Analyse énergétique	Recherche	Fourniture de connaissance	Performance énergétique et agroécologie	Divers	Diverse	Prédictif /mesuré Quantitatif
Indicateurs biodiversité	R&D	Conception, conseil	Impact sur la biodiversité	Divers	Diverse	Prédictif /mesuré Qualitatif/quantitatif
Dardonville et al. (2022)	R&D	Conception, conseil	SE potentiels, réels et utilisés fournis par le système de culture	Grande culture	Parcelle	Prédictif Semi quantitatif
NiCC'El	Recherche	Fourniture de connaissance	Complémentarité élevage-culture	Elevage ruminant	Exploitation agricole	Cause Quantitatif
Puech et Stark (2023)	Recherche	Fourniture de connaissance	Analyse des flux	Poly-culture élevage	Exploitation agricole	Prédictif Quantitatif.

TAPE : Une méthode d'évaluation basée sur les principes de l'agroécologie

Cette méthode globale d'évaluation d'exploitations agricoles développée dans le cadre de travaux de la FAO (Mottet et al., 2020) repose sur la mise en œuvre de quatre étapes (Figure 2) :

- Une étape préliminaire de description des systèmes et contexte dans lesquels la méthode doit être mise en œuvre : les caractéristiques démographiques des exploitations/ménages de ce territoire, de l'environnement écologique, de l'environnement social et productif et de la structure du marché dans le territoire ainsi que de l'environnement institutionnel qui pourrait être favorable à l'agroécologie
- Etape 1 : caractérisation de la transition agroécologique : évaluation de dix éléments liés entre eux, plus ou moins englobants qui sont déclinés en indices de caractérisation de la transition agroécologique (CAET). Ces CAET sont notés entre 0 et 4 selon une grille de notation. Ainsi, par exemple, le CAET « culture » (en haut du tableau de l'étape 1 à gauche sur la Figure 2) portant sur la diversité des cultures est notée 0 en cas de monoculture, 1 si une culture couvre au moins 80 % de la surface cultivée, 2 : si présence de 2 ou 3 cultures, 3 : si plus de 3 cultures adaptée aux conditions locales et changement climatique et 4 : si outre le cas précédent, la diversité est augmentée par les cultures associées ou la double culture, etc. Comme le nombre d'indices CAET varie selon les éléments, les résultats sont rapportés à la note maximale de l'élément en pourcentage. Une note de 12 pour les 4 indices de la diversité, par exemple, est standardisée en $12/16 = 75\%$.
- Etape 2 : évaluation des critères essentiels de performance agroécologique. Elle porte sur l'évaluation de dix performances agroécologiques définies par les experts : une relative à la gouvernance, trois économiques, une se rapportant à la santé et la nutrition, deux sociales et deux environnementales qui ne concernent que le système agricole. Ainsi, la dimension environnementale n'inclut pas les émissions de polluants vers différents compartiments environnementaux comme l'eau ou l'air mais reste limitée au sol agricole et à la biodiversité au sein du système agricole. Si les indicateurs économiques type marge sont calculés, un indice de Gini est mis en œuvre pour la biodiversité, utilisant des données sur les cultures, les variétés et des observations sur la végétation et les pollinisateurs. Pour le sol, une batterie de dix indicateurs facilement observables est utilisée.
- Etape 3 : analyse combinée des étapes 1 et 2 et interprétation participative. L'interprétation des résultats doit être menée de manière participative avec la communauté ou le territoire identifiés à l'étape 0 et dans lequel les enquêtes agricoles ont été menées. Les objectifs sont de : a) vérifier l'adéquation et la performance du cadre, b) confirmer/interpréter l'analyse pour la rendre pertinente par rapport au contexte, en ajustant les seuils utilisés à l'étape 2 pour « l'approche par feux tricolores » (étape 3 sur la Figure 2) ; en incluant une discussion sur l'échantillonnage et l'extrapolation de l'exploitation au territoire ; et c) concevoir/discuter des solutions possibles pour améliorer les indicateurs et soutenir la transition, en utilisant éventuellement l'outil pour suivre les progrès.

La méthode TAPE a été testée sur des exploitations agricoles de différents systèmes de production, tailles, pays, du Sud principalement (Angola, Argentine, Cambodge, Cuba, Thaïlande, ...). Par exemple, une évaluation menée sur une ferme intégrée en Thaïlande avec de la culture de riz, de l'élevage et de l'aquaculture a montré une intégration limitée entre les trois sous-systèmes sur cette exploitation, qui gardait une forte part de riz cultivé en monoculture.

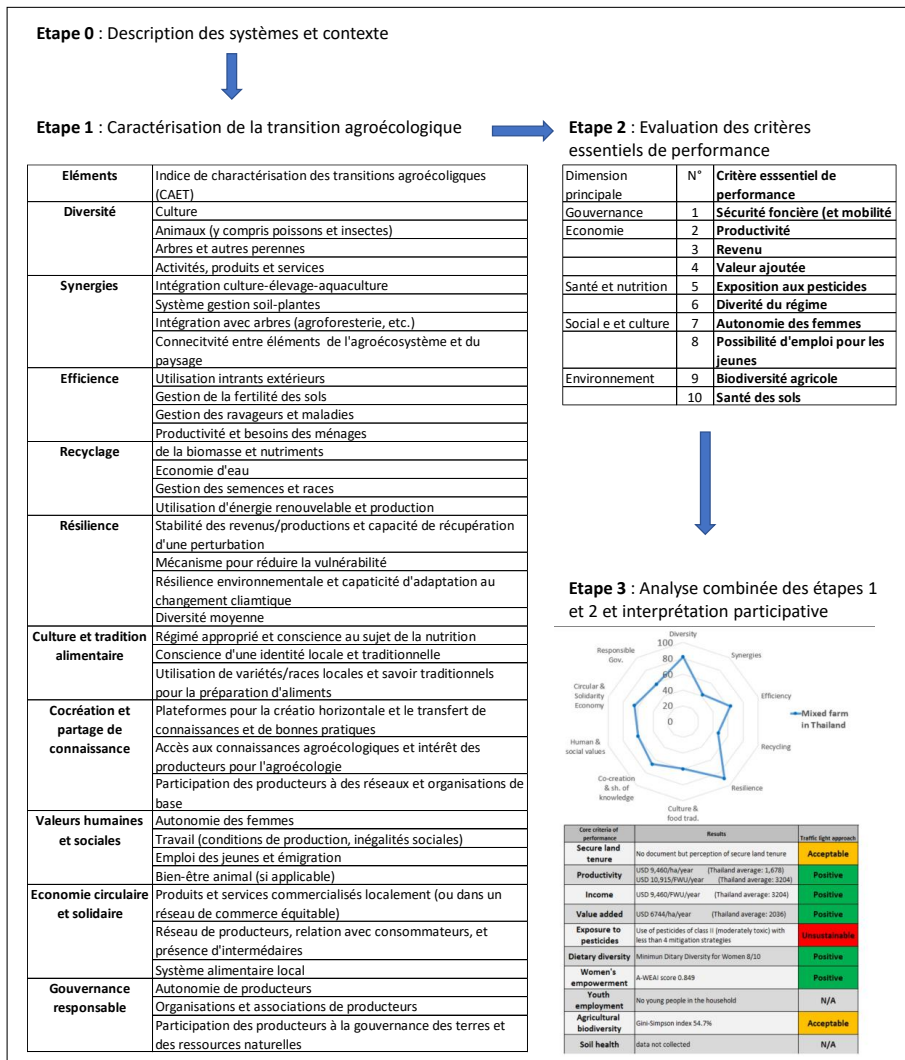


Figure 2 : Les quatre principales étapes de la méthode TAPE (Mottet et al., 2020).

Evaluation des impacts environnementaux

Analyse énergétique et agroécologie

L'analyse énergétique a souvent été utilisée pour évaluer la durabilité et le fonctionnement des systèmes agricoles (Hercher-Pasteur et al., 2020). L'approche en ACV consiste à comptabiliser toutes les entrées sous forme de consommation directe (pour le transport, les interventions culturales, le chauffage, etc.) et indirectes (pour la production des intrants, des machines, etc.). D'autres approches telle la méthode IDEA4 - propriétés (Zahm et al., 2015) se focalisent uniquement

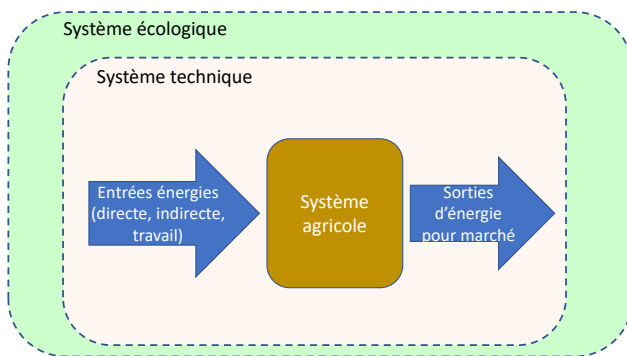
sur les principaux postes de consommation. D'autres comptabilisent encore toutes les sorties sous forme d'énergie contenue dans les produits issus de l'exploitation agricole. Des indicateurs comme l'efficacité (sorties/entrées), le bilan (sorties-entrées) ou simplement la consommation (Ex : en ACV) ont été proposés (Figure 3a).

Dans un système agroécologique, le recyclage est un élément important, comme indiqué dans la méthode TAPE (Figure 2). C'est ainsi que, dans une approche qualifiée d'agroécologique, la part d'énergie recyclée sous forme de biomasse non récoltée ou réutilisée par le système est aussi considérée (Figure 3b). Ceci conduit au calcul d'un indicateur d'efficacité agroécologique (ou EROI, retour d'énergie sur énergie investi). Il est basé sur le ratio :

$$\text{EROI agroécologique} = \frac{\text{Sorties énergie}}{(\text{Entrées énergie} + \text{énergie dans la biomasse non récoltée} + \text{énergie réutilisée})}$$

Celui-ci peut être complété par un indicateur estimant la part d'énergie dans la biomasse non récoltée par rapport à l'énergie total-entrant, dénommé « EROI biodiversité » (Guzmán et al., 2018), et la part d'énergie réutilisée par rapport aux entrées d'énergie.

a)



b)

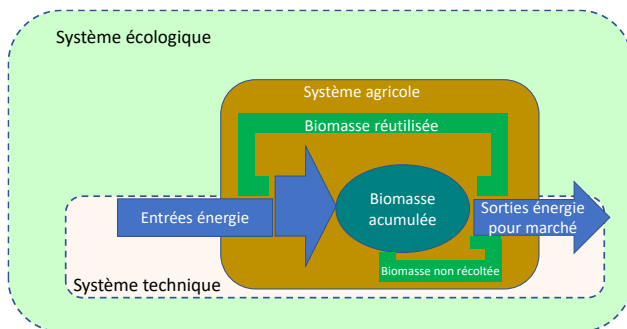


Figure 3 : Schéma des flux énergétiques pris en compte dans des approches d'analyse énergétique : a) conventionnelle, b) agroécologique (adapté de Hercher-Pasteur et al. (2020) et Guzmán et al. (2018)). Les termes « biomasses » désignent le contenu énergétique de la biomasse.

Évaluer la biodiversité

La biodiversité est un élément central en agroécologie par son rôle dans la fourniture de SE (Therond & Duru, 2019). Elle est l'un des critères de performance de l'étape 2 de TAPE. C'est cependant une thématique complexe pouvant être décrite par de nombreuses variables, au nombre de 23, regroupées en 6 grandes catégories (Geo-Bon, 2023) : composition génétique, populations d'espèces, traits des espèces, composition des communautés, fonctionnement des écosystèmes, structure des écosystèmes. Cependant, une majorité de travaux portent sur les populations d'espèces (abondance et diversité). A ceci, il faut ajouter la distinction entre :

- biodiversité planifiée, c'est-à-dire celle que gère directement l'agriculteur et qui concerne la diversité des animaux et des races, des espèces et variétés végétales,
- biodiversité associée, d'espèces sauvages non gérées directement par l'agriculteur. Il est encore possible de distinguer entre :
 - o une biodiversité para-agricole qui fournit des services écosystémiques, comme la régulation des ravageurs par des espèces d'auxiliaires des cultures. A ceux-ci s'ajoutent aussi des dis-services comme les dommages causés par les ravageurs,
 - o une biodiversité extra-agricole hébergée par les écosystèmes agricoles, qui est sous influence des pratiques agricoles, mais n'affecte pas l'agriculture dans l'état des connaissances actuelles.

Dans tous les cas, Bockstaller et al. (2019) ont montré qu'il existe de nombreux indicateurs de cause, basés sur des variables de pratiques comme la diversité des cultures, la taille des parcelles, l'intensité d'utilisation des pesticides. Il existe également des indicateurs d'effet, qui sont soit mesurés et portent généralement sur l'abondance et/ou le nombre d'espèces au sein d'un ou plusieurs groupes taxonomiques (Ex : la diversité floristique), soit prédictifs. Pour cette troisième famille d'indicateurs, les indicateurs d'effet prédictifs, le choix est plus restreint. Une majorité de ces indicateurs sont qualitatifs, reposant notamment sur des arbres de décision (avec des règles de décision « si alors ») construit avec l'outil DEXi (Bohanec, 2021).

Évaluer les services écosystémiques

La prise en compte des services écosystémiques est au cœur de l'agroécologie (Therond et al., 2017), mais a été jusqu'à maintenant peu traitée par les méthodes d'évaluation environnementale, comme montré par Soulé et al. (2021). Une méthode d'évaluation des SE fournis par les systèmes de culture a été développée par Dardonville et al. (2022). Elle comporte une structuration en quatre niveaux (Figure 4) :

- Evaluation de l'évolution du capital naturel décrit par quatre indicateurs : la matière organique du sol, l'érosion des sols (qui vient altérer le capital naturel), le phosphore du sol et la biodiversité ;
- Évaluation du service potentiel à partir du capital naturel et des pratiques portant sur la configuration spatio-temporelle et la composition (ex : rotation, habitats semi-naturels, ...)
- Evaluation du service réel qui résulte de la modulation du service potentiel par des pratiques culturales, telles l'utilisation d'insecticides ou le travail du sol ;
- Evaluation du service utilisé par l'agriculteur qui est issu d'une modulation du service réel par la mise en œuvre de technologies qui permettent de prendre en compte le service fourni, comme des outils de pilotage (par exemple pour la gestion de l'azote).

La méthode traite de neuf SE de régulation pour les agriculteurs : régulation des bioagresseurs (ravageurs, maladies, adventices), pollinisation, approvisionnement en eau, fourniture d'éléments minéraux (azote et phosphore), structuration du sol, maîtrise de l'érosion. Pour chaque niveau, un système de notation des pratiques a été mis en place à partir de la bibliographie et à dire d'experts pour obtenir un indicateur prédictif d'effet. Une moyenne des notes est calculée.

La méthode a été mise en œuvre sur un groupe de 28 exploitations de la région Grand Est et a permis d'identifier cinq groupes allant d'exploitations avec un niveau de SE réel élevé et de SE utilisés supérieur à la moyenne, sans épuisement du capital naturel, jusqu'à des exploitations avec

un niveau faible de SE réel et de faible à moyen pour le SE utilisé.

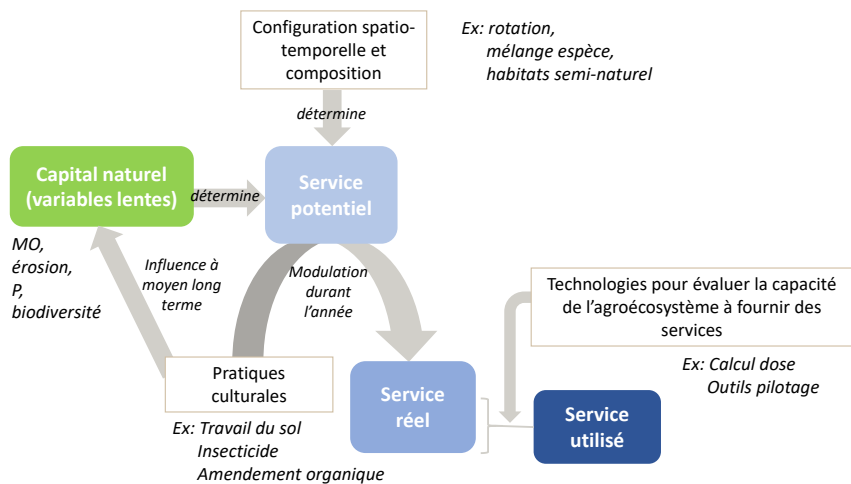


Figure 4 : Structure de la méthode d'évaluation des services écosystémiques fournis par les systèmes de culture (Dardonville et al., 2022).

Evaluation de systèmes diversifiés

Indicateur de diversité de la rotation en grandes cultures (I-DRo)

Comme montré par la méthode TAPE, la diversité des cultures est une composante essentielle en agroécologie. L'indicateur I-DRo développé par Keichinger et al. (2021) vise à évaluer la diversité des cultures dans les rotations sous l'angle temporel et spatial, taxonomique et fonctionnel (Figure 5) en n'utilisant que les données de la rotation (incluant les cultures de rentes – pure ou en association - ou en dérobée et les cultures intermédiaires) et la largeur des bandes de culture. L'indicateur est structuré en 3 composantes :

- **Un indicateur de services écosystémiques (I-SER)** qui évalue la contribution de la rotation à 12 services de régulation (dont la régulation des bioagresseurs, la fourniture d'azote, la pollinisation, etc.). Ces services sont évalués par un système d'équations et de notations utilisant des connaissances bibliographiques et expertes. L'indicateur de réduction de lixiviation du nitrate est ainsi basé sur une équation, utilisée aussi dans le projet européen NIVA⁴⁶ (Bockstaller et al., 2021). Ces indicateurs sont notés entre 0 (absence de service) et 1 (service maximum) et peuvent être agrégés par une moyenne corrigée par l'écart-type et l'amplitude des valeurs ainsi qu'un facteur de calibrage pour limiter la compensation entre indicateurs.
- **Un indicateur de diversité taxonomique (I-DCR)** basé sur l'indicateur de Simpson inversé (Jost, 2006) qui se comprend bien mieux que l'indice très populaire de Shannon (Jost, 2006). En effet, l'indice de Simpson donne le nombre de cultures dominantes. Les cultures intermédiaires sont comptées avec un poids plus faible de 33 %. Il est calibré sur la base des

⁴⁶ A New IACS Vision in Action : Ce projet a pour objectif, grâce à la télédétection, de réduire les coûts d'administration de la PAC tout en améliorant la durabilité et la compétitivité des systèmes agricoles.

choix suivants : 1, 2, 4 et dix cultures correspondent respectivement à des valeurs pour I-DCR de 0, 0,3, 0,6 et 1.

- Un indicateur de diversité spatiale (I-DSR) reposant sur la largeur des bandes cultivées avec une équation de régression calibrée avec les données suivant : I-DSR = 1 pour une largeur de 3 m, I-DSR = 0,5 pour une largeur de 27 m et I-DSR = 0 pour une largeur de 243 m (au-delà de 243 m, I-DSR = 0).

Si le premier sous-indicateur (I-SER) est un indicateur d'effet prédictif, les deux autres sont des indicateurs de cause basé sur des pratiques. Ces trois sous indicateurs peuvent être, si besoin, agrégés de manière hiérarchique en un indicateur global, comme montré sur la Figure 5. Celui-ci a été développé avec la méthode CONTRA (Bockstaller et al., 2017) qui permet d'éviter les effets de seuils et oblige à être transparent sur les choix de construction.

L'indicateur a été testé sur de nombreuses rotations, conventionnelles et innovantes, notamment dans le cadre du projet européen DiverIMPACTS (Messéan et al., 2021). Un antagonisme a été, entre autres, mis en évidence entre le SE de fourniture d'azote et la régulation des maladies dans les rotations à forte proportion de légumineuses. Ainsi l'introduction de légumineuse est un levier majeur dans la transition agroécologique des systèmes de production végétale, mais il doit être mobilisé avec modération pour ne pas créer de nouveaux problèmes.

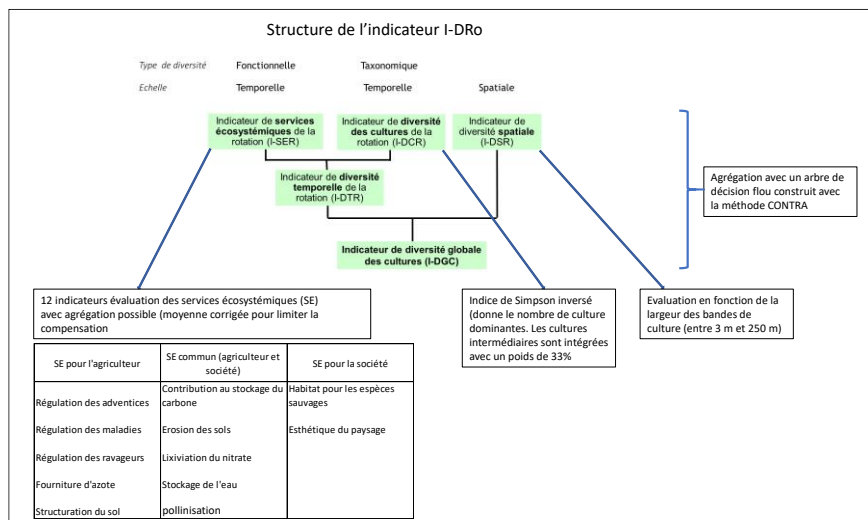


Figure 5 : Structure de l'indicateur de diversité des rotations I-DRo (Keichinger et al., 2021).

Evaluation de la complémentarité élevage-culture : l'indicateur NiCC'EI

La méthode TAPE a introduit un élément « synergie » comprenant un critère d'intégration culture-élevage. Plusieurs études ont abordé ce couplage avec des utilisations combinées de méthodes d'évaluation multicritères. Des exemples sont :

- Le projet POSCIF qui évalue la triple performance dans le cas du pâturage d'ovins dans des couverts de systèmes céréaliers (Verret et al., 2022),
- Le projet DiverIMPACTS, avec une modélisation intégrée, réalisée avec la plateforme MAELIA, d'exploitations pratiquant les échanges paille-fumier et des modifications de rotation chez les céréaliers (Catarino et al., 2021).

Cependant, l'objet de ces études n'était pas d'évaluer le degré d'intégration ou de couplage culture-élevage.

Martel et al. (2017) ont développé un indicateur spécifique, NiCC'El, à partir de dix critères relevés sur 1190 fermes bovines dans trois réseaux (Institut de l'Élevage - Inosys, réseau CIVAM et réseau Charolais INRAE). Ces dix critères traitent de l'utilisation des surfaces pour les animaux, de l'autonomie alimentaire et en litière du troupeau et de l'autonomie en fertilisation azotée des végétaux (Tableau 2). Des variables liées au partage du travail ou de matériel entre ateliers ou encore les échanges paille-fumier n'ont pas pu être incluses, faute de données. Cet indicateur repose sur une analyse multivariée et est calculé à l'aide des coordonnées de l'exploitation sur les axes 1, 2 et 3, pondérées par l'inertie de l'axe. Ces axes portent respectivement sur la part de surface dédiée à l'alimentation animale et aux achats d'engrais (axe1), sur l'autonomie protéique et en achat de pailles ainsi que la part de maïs dans la SFP (axe 2) et sur les achats de fourrages par UGB et la part des surfaces en protéagineux dans les cultures (axe 3). Deux seuils ont été proposés pour avoir une répartition des 1190 exploitations en 3 classes de couplage aux effectifs assez semblables (faible : 30 %, moyen : 40 %, élevé : 30 %). Cet indicateur a fait l'objet d'aménagements pour en faciliter l'usage et de l'adaptation à une autre filière, celle de volailles de chair en exploitations spécialisées (Martel et al., 2020).

L'étude sur la filière bovine a permis de montrer que le couplage est possible pour tout type d'exploitation et que les exploitations les plus couplées sont aussi celles qui ont montré les meilleures performances économiques et environnementales.

Tableau 2 : Les 10 critères retenues pour le calcul de l'indicateur NiCC'El de caractérisation du couplage culture-élevage (Martel et al., 2017)

N°	Variable
	Utilisation des surfaces pour les animaux
1	% de la SAU dédiée à l'alimentation animale (y compris les surfaces de couvert d'intercultures)
2	% de maïs dans la SFP
3	% des cultures non fourragères dédiées à l'alimentation animale (y compris les surfaces stockées mobilisées pour l'auto-consommation)
4	Surface de couvert d'interculture dédiée à l'alimentation animale (/ SAU)
	Autonomie alimentaire et en litière du troupeau
5	Autonomie en concentrés
6	Somme dépensée par UGB pour l'achat de fourrage
7	Nombre d'années avec achat de paille
	Autonomie en fertilisation azotée des végétaux
8	Somme dépensée par hectare pour la fertilisation sur les surfaces cultivées
9	Somme dépensée par hectare pour la fertilisation sur les surfaces en herbe
10	Part de protéagineux dans les surfaces non fourragères

Évaluation agroécologique de la production alimentaire

Pour aller plus loin dans l'évaluation système associant culture et élevage, Puech et Stark (2023) ont proposé des indicateurs issus de l'analyse des réseaux écologiques, une approche générique qui ne dépend pas d'un jeu de données comme c'est le cas de l'indicateur NiCC'El. Cette approche nécessite de décrire le métabolisme et de quantifier des flux de matière du système culture-élevage (Ex : kg N). Plusieurs indicateurs d'intégration culture élevage, dont le détail dépasse largement le cadre de cet article, sont brièvement présentés dans le Tableau 3. Ces indicateurs peuvent être utilisés pour comparer des systèmes mais la question des valeurs cibles à atteindre pour avoir un système durable reste à traiter.

Ces auteurs ont comparé un système bovin-lait basé sur l'herbe et un système diversifié (bovin lait, porc plein air, ovin) en utilisant ces indicateurs et d'autres indicateurs de performance (efficacité, productivité, résilience, etc.). Les systèmes se sont révélés proches par leurs taux de circulation interne (voisins de 75%) et une équitabilité moyenne des flux (proche de 0.5) mais avec des flux plus importants dans le système bovin lait et plus d'échanges dans le système diversifié.

Tableau 3 : Indicateurs d'intégration culture-élevage de (Puech et Stark, 2023).

Indicateur	Méthode de calcul
Flux totaux dans le système (FT)	Ensemble de flux (ex : en kg N/ha) dans le système
Flux interne (FI)	Ensemble des flux internes (Ex: en kg N/ha) dans le système (on exclut les entrées venant de l'extérieur et on ajoute le stockage interne).
Taux de circulation interne	Ratio des deux (FI/FT)
Information mutuelle moyenne (IMM)	Fonction du nombre d'échanges dans le système
Incertitude statistique (IS)	Hétérogénéité des flux dans les échanges
Incertitude réalisée	Ratio des deux (IM/IS) : une valeur de 1 signifie que les flux sont très concentrés sur peu de relation et une valeur de 0 signifie que les flux sont équitablement répartis

Discussion

Un nouveau cadre conceptuel plus large et intégrateur

Le cadre conceptuel que nous avons développé permet de positionner la partie spécifiquement « agroécologique » des méthodes présentées ci-avant ou des indicateurs cités sur la chaîne causale. Dans la construction de ce cadre, nous avons cherché un compromis entre la complexité de celui de Bergez et al. (2022) et d'autres cadres comme le DPSIR. Dans le premier, les systèmes sociotechniques et écologiques sont distingués de manière explicite, ce que nous n'avons pas fait par souci de simplification, si ce n'est dans la boîte « fonctionnement du système » à la Figure 1, pour laquelle nous avons distingué l'écosystème et le système technique. Cependant, nous sommes allés plus loin que les autres cadres de classification en positionnant les trois orientations possibles des approches d'évaluation de la durabilité revus par Zahm et al. (2015). De même, nous avons introduit le système étudié (en ACV, la technosphère) en le distinguant du système englobant (l'écosphère, pour la partie environnementale en ACV), ce qui est à mettre en parallèle avec les impacts locaux et globaux en ACV. Ce système comprend à la fois l'écosystème agricole pourvoyeur de services écosystémiques et le sous-système technique qui engendre des processus parallèles à l'écosystème (ex : recyclage).

Des méthodes et indicateurs pour la transition et non sur la transition agroécologique

Dans cet article nous avons abordé à la fois des méthodes d'évaluation reposant sur une liste d'indicateurs et des indicateurs spécifiques pour aborder certains enjeux de l'agroécologie et de la durabilité (biodiversité, énergie, services écosystémiques) comme résumé dans le Tableau 1. Pour la méthode TAPE, comme pour celles évaluant un élément important de l'agroécologie, l'intégration culture-élevage, nous nous sommes centrés sur la partie agronomique. Certaines

méthodes telle TAPE sont complétées par une évaluation multicritère des performances économiques, sociales et environnementales, telles que celles proposées dans les méthodes MASC 2.0 (Craheix et al., 2012), DEXiFruits (Alaphilippe et al., 2017) ou IDEA4 (Zahm et al., 2019). D'autres, comme les indicateurs de services écosystémiques, peuvent les compléter. Ces méthodes et indicateurs permettent d'évaluer les performances et propriétés de systèmes en transition agroécologique, mais pas directement leur niveau atteint dans cette dynamique. Celle-ci pourrait être abordée par une répétition de leur évaluation au cours de la transition à l'aide d'une série de données temporelles qui permettrait d'estimer les progrès venant de diversification, recyclage, etc. Mais il manque certainement encore des indicateurs évaluant réellement la transition proprement dite.

Des méthodes et indicateurs qui évaluent le fonctionnement du système

Il ressort de la revue de ces méthodes/indicateurs que la partie spécifiquement « agroécologique » porte sur le fonctionnement du système (en reprenant la terminologie de notre cadre conceptuel, cf. Figure 1), alors que les méthodes d'évaluation de la durabilité se concentraient jusqu'à maintenant sur les entrées (pratiques) et/ou les sorties (impacts/production), et dans certains cas plus rares sur les propriétés systémiques (Soulé et al., 2021). L'évaluation de la transition agroécologique pousse donc à « ouvrir le capot du système » et à ne pas le considérer comme une boîte noire. Ceci peut se faire à des degrés divers.

Par rapport au cadre décrit dans la Figure 1, la méthode TAPE propose des éléments de raisonnement ou des principes de l'étape 1, qui mélangent pratiques (ex : diversité des cultures) et propriétés systémiques (ex : résilience), tandis que l'étape 2 porte sur des objectifs (biodiversité, santé des sols), par rapport au cadre de la Figure 1. Certains éléments se retrouvent dans des méthodes d'évaluation multicritère classique telle IDEA4 (Zahm et al. 2019). Ainsi, la diversité peut être reliée aux pratiques (ex : choix des productions, des cultures, des variétés ou races) et l'efficacité porte sur des rapports entrées/sorties (Hercher-Pasteur et al., 2020). En revanche, les éléments de synergies et de recyclage, d'intégration culture-élevage, conduisent à une dimension réellement systémique. De même, la résilience prend en compte les aspects dynamiques peu couverts par les méthodes d'évaluation environnementale (Soulé et al., 2021). Dans tous les cas, les indicateurs proposés sont très simples, reposant sur des variables causales, des mesures très faciles, présentant donc un faible caractère prédictif. Ainsi la résilience n'est pas traitée sous l'angle dynamique par une série temporelle mais par des variables statiques.

En analyse énergétique, qui a l'avantage d'être quantitative, des indicateurs spécifiques ont été proposés pour entrer dans le fonctionnement du système et ne pas juste considérer les entrées et les sorties mais aussi le type d'intrants et les flux internes. Quant à l'indicateur NICC'EI, il fournit une information limitée sur le degré de complémentarité sans donner d'informations précises sur les synergies entre élevage et cultures. Enfin, c'est dans l'approche de Puech et Stark (2023) que le système est réellement ouvert avec une description du métabolisme, une quantification de tous les flux internes.

Pour la question de l'intégration des différentes productions au sein d'une exploitation agricole, la méthode TAPE, à la différence des suivantes, ne traite pas que de l'intégration culture-élevage terrestre mais ajoute l'aquaculture, dans le cas de systèmes intégrés (Lazard, 1986). Par ailleurs, elle comprend aussi un indicateur sur l'intégration des arbres, pour évaluer des systèmes agroforestiers (Alaphilippe et al., dans cette revue) ou de permaculture. La méthode développée par Puech et Stark (2023) pourrait tout à fait s'appliquer à ces systèmes impliquant des cultures ou éléments pérennes. Mais, là encore, cela nécessite des mesures de flux entre tous les éléments.

Des méthodes et indicateurs de faisabilité variables

En termes de faisabilité, les indicateurs de la méthode TAPE restent faciles à mettre en œuvre avec des données de l'exploitation ou des observations de terrain abordables pour les praticiens non chercheurs. De même, l'indicateur I-DRo est facile à calculer avec pour seule donnée la rotation, accessible du moins en termes de séquence de culture par le RPG. La méthode proposée par Dardonville et al. (2022) demande une description plus complète du système de culture et quelques données paysagères semi quantitative. L'indicateur NICC'EI reste calculable avec des données recueillies sur l'exploitation même si son calcul est plus élaboré. Les indicateurs d'analyse énergétique proposés demandent des données pas forcément accessibles sur les flux de biomasse non utilisées, etc. Cependant c'est certainement la méthode proposée par Puech et Stark (2023) qui demande l'investissement le plus conséquent, qui n'est possible que dans des projets de recherche et développement. Ces auteurs ont aussi ajouté des indicateurs de performances comme l'efficacité et la résilience, qui sont des propriétés du système mais qui peuvent aussi être reliés à des objectifs de durabilité, productivité ou de pertes en nutriments. Ces deux dimensions se retrouvent dans d'autres listes d'indicateurs mais peuvent aussi être structurées et différenciées comme dans la méthode IDEA4 (Zahm et al., 2019). Il est à noter que Puech et Stark (2023) se sont focalisés sur des flux de matière et n'ont pas traité des interactions biotiques ou des processus écologiques. Le réseau causal complexe dans un système agroécologique de culture en plein champ, proposé par Hawes et al. (2021) pourrait servir de base à un tel travail. Ces auteurs ont relié les pratiques, les composantes biologiques (ex : ravageurs, auxiliaires), les SE et les sorties (Rendements et impacts environnementaux).

La question de l'évaluation des services écosystémiques

Le concept de services écosystémiques (SE) est au cœur de l'agroécologie (Therond et al., 2017) bien qu'il n'ait pas été identifié dans la méthode TAPE. Il est vrai que la notion de service écosystémique dans les agroécosystèmes est complexe (Soulé et al., 2023 ; Tibi et Therond, 2017), car il y a une imbrication forte des processus écologiques et sociotechniques (Lescourret et al., 2015). Cela a conduit Soulé et al. (dans ce numéro), à développer une évaluation conjointe des SE et des impacts. Par ailleurs, Dardonville et al. (2022) se sont aussi appuyés sur ces définitions précises du concept de SE pour développer leur méthode, ce qui les a amenés à distinguer capital naturel, services potentiels, réels et réellement utilisés. Cette approche assez exhaustive pourra être améliorée avec l'acquisition de nouvelles connaissances plus quantitatives sur les relations pratiques-services. Un autre point d'amélioration est l'agrégation des éléments qui repose sur des moyennes. Or, ce calcul de moyenne pose clairement des questions sur l'additivité et la compensation des critères (Lairez et al., 2015). La méthode I-DRo, bien que d'une portée bien plus limitée en ne traitant que des services potentiels liés à la diversification des cultures dans la rotation, propose des méthodes de calcul et des méthodes d'agrégation permettant d'éviter les compensations entre critères. Dans tous les cas, ces deux méthodes sont bien plus élaborées que l'approche classique utilisant des proxies de surfaces d'occupation des sols pondérés par des coefficients de service, ce qui a été critiqué par certains auteurs (Eigenbrod et al., 2010).

Un sujet sensible : la prise en compte de la productivité dans l'évaluation environnementale

Par ailleurs, un défi dans l'évaluation environnementale des systèmes agroécologiques reste le problème de la productivité, qui peut être plus faible dans les systèmes agroécologiques. Ceci influe fortement sur les résultats dans les méthodes basées sur l'ACV. Ces dernières tendent à attribuer un même voire un plus faible impact aux systèmes intensifs qu'extensifs (dont des systèmes agroécologiques) par leur approche par produit, ne rendant pas compte d'autres éléments que l'agroécologie vise à améliorer (biodiversité, santé du sol et réduction de l'usage des pesticides). Ceci pose beaucoup de questions au vu de tous les travaux montrant les impacts négatifs de l'intensification. Un certain nombre d'approches ont cherché à intégrer le concept de services

écosystémiques à l'ACV (De Luca Peña et al., 2022). Un moyen possible est de réallouer une part des impacts à la fourniture de SE soit avec un système de notation biophysique (Boone et al., 2019) soit en se basant sur leur valeur monétaire (Bragaglio et al., 2020). Ces calculs peuvent conduire à rééquilibrer les résultats d'une ACV exprimée en kg produit entre systèmes agroécologiques et intensifs, voire à avantager les systèmes agroécologiques qui étaient défavorisés par une absence de réallocation. Mais ces méthodes de réallocation mériteraient d'être retravaillées pour éviter tout biais et incohérence.

Conclusion

En conclusion, nous avons vu que les indicateurs utilisés dans la méthode TAPE sont des indicateurs de cause et ne sont pas prédictifs ou sont mesurés mais avec des mesures assez frustrées comme proxies des impacts. Ainsi, ils ne permettant pas d'évaluer un effet. De même, l'évaluation de la biodiversité manque encore d'indicateurs prédictifs quantitatifs ou au moins semi quantitatifs, reposant sur des connaissances solides. Or, des méthodes reposant sur de tels indicateurs sont indispensables pour la réalisation d'évaluations pertinentes par les agronomes, car elles permettraient d'interpréter les résultats en faisant le lien avec les pratiques. Cela assurerait ainsi de travailler sur des solutions et systèmes de culture innovants répondant aux enjeux de l'agroécologie. L'acquisition de nouvelles connaissances issues de l'effort de recherche en cours va certainement permettre de progresser. Dans tous les cas, la palette de méthodes et indicateurs présentés dans cet article pourrait déjà rendre possible le développement d'une nouvelle méthode avec une base conceptuelle issue de TAPE comprenant des indicateurs plus élaborés issus de autres approches présentées ici, et en intégrant le concept de service écosystémique. Enfin, ces méthodes et indicateurs sont destinés à évaluer des systèmes en transition agroécologique mais n'évalue pas directement la transition, ce qui pourrait se faire par des séries temporelles, voire par des indicateurs spécifiques, ce qui reste un front de recherche.

Bibliographie

- Bergez, J.-E., Béthinger, A., Bockstaller, C., Cederberg, C., Ceschia, E., Guilpart, N., Lange, S., Müller, F., Reidsma, P., Riviere, C., Schader, C., Therond, O., van der Werf, H. M. G., 2022. Integrating agri-environmental indicators, ecosystem services assessment, life cycle assessment and yield gap analysis to assess the environmental sustainability of agriculture. *Ecological Indicators*, 141, 109107.
- Bockstaller, C., Gilbert, M. (2019). *Le changement de niveau d'organisation dans l'évaluation de la durabilité des systèmes et territoires agricoles: Contribution à l'élaboration d'un guide méthodologique.*
- Bockstaller, C., Lassere-Joulin, F., Meiss, H., Sausse, C., van der Werf, H., Denoirjean, T., Ranjard, L., Angevin, F., Manneville, V., Michel, N., Tosser, V., Plantureux, S., 2019. Les indicateurs de biodiversité pour accompagner les agriculteurs : embarras du choix ou pénurie ? *Innovations Agronomiques*, 75, 73–86.
- Bockstaller, C., Sirami, C., Sheeren, D., Keichinger, O., Arnaud, L., Favreau, A., Angevin, F., Laurent, D., Marchand, G., De Laroche, E., Ceschia, E. 2021. Apports de la télédétection au calcul d'indicateurs agri-environnementaux au service de la PAC, des agriculteurs et porteurs d'enjeu. *Innovations Agronomiques*, 83, 43–59.
- Bockstaller, Christian, Beauchet, S., Manneville, V., Amiaud, B., Botreau, R., 2017. A tool to design fuzzy decision trees for sustainability assessment. *Environmental Modelling Software*, 97, 130–144.
- Bockstaller, Christian, Feschet, P., Angevin, F., 2015. Issues in evaluating sustainability of farming systems with indicators. *OCL - Oilseeds and Fats*, 22(1).
- Bohanec, M., 2021. *DEXi: Program for Multi-Attribute Decision Making. User's Manual. Version 5.05.*
- Bonvillain, T., Foucherot, C., Bellassen, V., 2020. *L'obligation de résultats environnementaux verra-t-elle la PAC? Comparaison des coûts et de l'efficacité de six instruments de transition vers une agriculture durable.* Institut de l'économie pour le climat I4CE, Paris.
- Boone, L., Roldán-Ruiz, I., Van linden, V., Muylle, H., Dewulf, J., 2019. Environmental sustainability of conventional and organic farming: Accounting for ecosystem services in life cycle assessment. *Science of the Total Environment*, 695, 133841.
- Braband, D., Geier, U., Kopke, U., 2003. Bio-resource evaluation within agri-environmental assessment tools in different

- European countries. *Agriculture Ecosystems and Environment*, 98, 423–434.
- Bragaglio, A., Braghieri, A., Pacelli, C., Napolitano, F., 2020. Environmental Impacts of Beef as Corrected for the Provision of Ecosystem Services. *Sustainability* 2020, 12, 3828/
- Castoldi, N., Schmid, A., Bechini, L., Binder, C. R., 2010. Trade-off analysis for agro-ecological indicators: application of Sustainable Solution Space to maize cropping systems in northern Italy - Zurich Open Repository and Archive. In I. Darnhofer (Ed.), *Darnhofer, I. Building sustainable rural futures : the added value of systems approaches in times of change and uncertainty; 9th European IFSA Symposium; 4-7 July 2010* (pp. 850–860). BOKU : Universität für Bodenkultur Wien, <https://www.zora.uzh.ch/id/eprint/46134/>
- Catarino, R., Therond, O., Berthomier, J., Miara, M., Mérot, E., Misslin, R., Vanhove, P., Villerd, J., Angevin, F., 2021. Fostering local crop-livestock integration via legume exchanges using an innovative integrated assessment and modelling approach based on the MAELIA platform. *Agricultural Systems*, 189, 103066.
- Craheix, D., Angevin, F., Bergez, J. E., Bockstaller, C., Colomb, B., Guichard, L., Reau, R., Doré, T., 2012. MASC 2.0, un outil d'évaluation multicritère pour estimer la contribution des systèmes de culture au développement durable. *Innovations Agronomiques*, 20, 35–48.
- Dardonville, M., Legrand, B., Clivot, H., Bernardin, C., Bockstaller, C., Therond, O., 2022. Assessment of ecosystem services and natural capital dynamics in agroecosystems. *Ecosystem Services*, 54,
- De Luca Peña, L. V., Taelman, S. E., Prétat, N., Boone, L., Van der Biest, K., Custódio, M., Hernandez Lucas, S., Everaert, G., Dewulf, J., 2022. Towards a comprehensive sustainability methodology to assess anthropogenic impacts on ecosystems: Review of the integration of Life Cycle Assessment, Environmental Risk Assessment and Ecosystem Services Assessment. *Science of The Total Environment*, 808, 152125.
- EEA. (2005). *Agriculture and environment in EU-15; the IRENA indicator report*. European Environmental Agency (EEA), Copenhagen (Denmark).
- Eigenbrod, F., Armsworth, P. R., Anderson, B. J., Heinemeyer, A., Gillings, S., Roy, D. B., Thomas, C. D., Gaston, K. J., 2010. The impact of proxy-based methods on mapping the distribution of ecosystem services. *Journal of Applied Ecology*, 47(2), 377–385. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2664.2010.01777.>
- Geo-Bon. (2023). *Essential Biodiversity Variables*. <https://geobon.org/ebvs/what-are-ebvs/>
- Girardin, P., 1993. Agriculture intégrée : au-delà des mythes... un défi. *Cahiers Agricultures*, 2, 141–145.
- Girardin, P., Bockstaller, C. 1997. Les indicateurs agro-écologiques, outils pour évaluer les systèmes de culture. *Oléagineux Corps Gras Lipides*, 418–426.
- Guillou, M., Guyomard, H., Huyghe, C., Peyraud, J.-L. 2013. *Vers des agricultures doublement performantes pour concilier compétitivité et respect de l'environnement. Propositions pour le Ministre*. Agreenium, INRA.
- Guzmán, G. I., González de Molina, M., Soto Fernández, D., Infante-Amate, J., Aguilera, E., 2018. Spanish agriculture from 1900 to 2008: a long-term perspective on agroecosystem energy from an agroecological approach. *Regional Environmental Change*, 18, 995–1008.
- Hawes, C., Iannetta, P. P. M., Squire, G. R., 2021. Agroecological practices for whole-system sustainability. *CAB Reviews: Perspectives in Agriculture, Veterinary Science, Nutrition and Natural*
- Hercher-Pasteur, J., Loiseau, E., Sinfort, C., Hélias, A., 2020. Energetic assessment of the agricultural production system. A review. *Agronomy for Sustainable Development* 2020 40, 1–23.
- Jost, L., 2006. Entropy and diversity. *Oikos*, 113, 363–375.
- Keichinger, O., Viguié, L., Hellou, G., Messéan, A., Angevin, F., Bockstaller, C., 2021. Un indicateur évaluant la diversité globale des rotations : de la diversité des cultures aux services écosystémiques. *Agronomie, Environnement et Sociétés*, 11, 1–19.
- Lairez, J., Feschet, P., Aubin, J., Bockstaller, C., Bouvarel, I., 2015. *Evaluer la durabilité en agriculture - Guide pour l'analyse multicritère en productions animales et végétales*. Editions Quae, Versailles.
- Lang, D. J., Scholz, R. W., Binder, C. R., Wiek, A., Stäubli, B., 2007. Sustainability Potential Analysis (SPA) of landfills – a systemic approach: theoretical considerations. *Journal of Cleaner Production*, 15(1), 1628–1638.
- Lazard, J., 1986. *La pisciculture : une comporante des systèmes de production agricoles*. Séminaire « Relations Agriculture Elevage » DSA-CIRAD 10-13 Septembre 1985.
- Leroux, B., 2015. L'émergence de l'agriculture biologique en France : 1950-1990. *Pour*, 3, 59–66.
- Lescourret, F., Magda, D., Richard, G., Adam-Blondin, A. F., Bardy, M., Baudry, J., Doussan, I., Dumont, B., Lefèvre, F., Litrico, I., Martin-Clouaire, R., Montuelle, B., Pellerin, S., Plantegenest, M., Tancoigne, E., Thomas, A., Guyomard, H.,

Soussana, J. F., 2015. A social-ecological approach to managing multiple agro-ecosystem services. *Current Opinion in Environmental Sustainability*, 14, 68–75.

Martel, G., Guilbert, C., Veysset, P., Durant, D., Mischler, P., 2017. Mieux coupler cultures et élevage dans les exploitations d'herbivores conventionnelles et biologiques : une voie d'amélioration de leur durabilité ? *Fourrages*, n°231, 235–345.

Martel, G., Ramette, C., Bouvarel, I., Bureau, A., Fontanet, J. M., Mischler, P., 2020. NiCC'El. Un outil pour caractériser le niveau d'interaction entre cultures et élevage d'une exploitation et identifier les voies d'amélioration. *Innovations Agronomiques*, 80, 33–40.

Messéan, A., Vigié, L., Paresys, L., Stilmant, D., 2021. Promoting crop diversification for more sustainable agri-food systems. <https://www.diverimpacts.net/>

Mottet, A., Bicksler, A., Lucantoni, D., De Rosa, F., Scherf, B., Scopel, E., López-Ridaura, S., Gemmil-Herren, B., Bezner Kerr, R., Sourisseau, J.-M., Petersen, P., Chotte, J.-L., Loconto, A., Tiftonell, P., 2020. Assessing Transitions to Sustainable Agricultural and Food Systems: A Tool for Agroecology Performance Evaluation (TAPE). *Frontiers in Sustainable Food Systems*, 4, 579154.

Payraudeau, S., van der Werf, H. M. G., 2005. Environmental impact assessment for a farming region: a review of methods. *Agriculture Ecosystems and Environment*, 107, 1–19.

Prost, L., Martin, G., Ballot, R., Benoit, M., Bergez, J.-E., Bockstaller, C., Cerf, M., Deytieux, V., Hossard, L., Jeuffroy, M.-H., Leclère, M., Le Bail, M., Le Gal, P.-Y., Loyce, C., Merot, A., Meynard, J.-M., Mignolet, C., Munier-Jolain, N., Novak, S., van der Werf, H., 2023. Key research challenges to supporting farm transitions to agroecology in advanced economies. A review. *Agronomy for Sustainable Development* 2023, 43, 1–19.

Puech, T., Stark, F., 2023. Diversification of an integrated crop-livestock system: Agroecological and food production assessment at farm scale. *Agriculture, Ecosystems Environment*, 344, 108300.

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.

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.

Therond, O., Duru, M., 2019. Agriculture et biodiversité: les services écosystémiques, une voie de réconciliation. *Innovations Agronomiques*, 75, 29–47.

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>

Tibi, A., Therond, O., 2017. *Évaluation des services écosystémiques rendus par les écosystèmes agricoles. Une contribution au programme EFES. Etude INRA, Paris.*

Verret, V., Sagot, L., Gauthier, D., Mischler, P., Emonet, E., Levavasseur, F., Lescoat, P., Pissonnier, S., Havet, A., Wolgust, V., Pechoux, S., 2022. POSCIF : Pâturage ovin en systèmes céréaliers en Île-de-France. <https://librairie.ademe.fr/>

Wezel, A., Bellon, S., Dore, T., Francis, C., Vallod, D., David, C., 2009. Agroecology as a science, a movement and a practice. A review. *Agronomy for Sustainable Development*, 29, 503–515.

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.



Référentiels et nouveaux indicateurs pour fonder une agriculture régénératrice

Olivier Husson*, Jean-Pierre Sarthou** et Michel Duru***

* CIRAD, UPR AIDA, Avenue Agropolis F34398, Montpellier, France et AIDA, Univ. Montpellier, CIRAD, Montpellier, France, olivier.husson@cirad.fr

** Ensat et UMR LEFE CNRS-INPT-UT3, Université de Toulouse, jean-pierre.sarthou@toulouse-inp.fr

*** UMR 1248 AGIR, INRAE, Université Toulouse, INPT, 31326 Castanet Tolosan, France, michel.duru@inrae.fr (auteur correspondant)

Résumé

Les formes d'agriculture se revendiquant de l'agroécologie (agriculture biologique, agriculture de conservation des sols, agriculture régénératrice) sont souvent basées sur des principes ou des cahiers des charges qui ne garantissent pas toujours une réduction des impacts négatifs des pratiques ou un niveau de fourniture de services à la hauteur des promesses annoncées. La littérature fait ressortir les rôles indispensables des microorganismes du sol et du potentiel d'oxydo-réduction (ou rédox) en interaction avec le pH pour la santé du sol et des plantes. L'étude des processus écologiques montre comment il est possible de réduire fortement voire de s'affranchir, progressivement, des énergies fossiles et des intrants de synthèse, en combinant les choix des cultures et intercultures, la gestion de la biomasse, du sol et des intrants de synthèse (type et mode d'application). Sur ces bases, il est possible de contextualiser les pratiques à mettre en œuvre selon l'état de santé du sol dont un indicateur simple est le rapport matières organiques% / argiles%.

Mots clefs : agroécologie ; agriculture biologique ; agriculture de conservation des sols ; agriculture régénératrice ; biodiversité ; potentiel rédox ; santé du sol ; services écosystémiques ; trajectoires de régénération ou de dégradation des sols ; transition agroécologique

Abstract

Forms of agriculture claiming agroecology (organic agriculture, soil conservation agriculture, regenerative agriculture) are based on principles or sometimes specifications that do not always guarantee a reduction in the negative impact of practices, or a level of ecosystem services commensurate with the announced promises. The literature highlights the key roles of soil microorganisms and oxidation-reduction (or redox) potential in interaction with pH for soil and plant health. The study of ecological processes shows how it is possible to greatly reduce or even gradually eliminate fossil fuels and synthetic inputs, by combining the choice of crops and intercrops, the management of biomass, soil and synthetic inputs. On these bases, it is possible to define practices to be implemented according to the state of health of the soil, a simple indicator of which is the organic matter % / clay % ratio.

Keywords: agroecology; Organic Agriculture; soil conservation agriculture; regenerative agriculture; biodiversity; redox potential; ecosystem services ; soil health; soil regeneration or degradation trajectories ; agroecological transition

Formes d'agriculture en quête de durabilité

Dans les pays industrialisés, les impacts environnementaux de l'agriculture basée sur l'utilisation massive d'intrants industriels, et des paysages qu'elle génère, sont si importants qu'elle est considérée comme la première activité humaine conduisant au dépassement des limites planétaires pour les cycles biogéochimiques et la biodiversité (Campbell et al., 2017). En Europe, l'utilisation d'engrais azotés de synthèse a été multipliée par 4,4 entre le début des années 60 et la fin des années 80, entraînant d'importantes perturbations des écosystèmes (Lassaletta et al., 2016), même si leur utilisation a diminué de 25% depuis (FAOstat). En parallèle, l'utilisation de pesticides a très fortement augmenté pour atteindre un pic au début des années 1990 et n'a diminué que de 9% depuis (FAOstat), malgré des politiques dédiées. Leur utilisation intensive a eu des conséquences négatives sur la biodiversité, les régulations biologiques (Geiger et al., 2010), le développement de résistances aux bioagresseurs (Powles et Yu, 2010) et la santé humaine (Nicolopoulou-Stamati et al., 2016). Ces intrants, combinés à la mécanisation, ont permis aux agriculteurs de simplifier radicalement les séquences de cultures via des rotations courtes (de cultures pures) voire des monocultures (Bennett et al., 2012). En France, cinq espèces (blé, orge, maïs, colza, tournesol) correspondent à 90% des surfaces en cultures annuelles (Agreste). Dans le même temps, la réduction de la superficie des habitats non cultivés et l'augmentation de la taille des parcelles ont conduit à une forte simplification des paysages (composition et configuration), générant de moindres régulations biologiques (Rusch et al., 2016).

Face à ce constat, diverses initiatives sont expérimentées par les agriculteurs, appuyées par leur environnement professionnel et soutenues pour certaines par des politiques publiques. On peut schématiquement distinguer deux grandes voies (Duru et al., 2015). L'une, généralement nommée agriculture raisonnée vise la réduction des impacts négatifs en augmentant l'efficacité des intrants par la robotique, le numérique et la génétique, mais repose toujours sur une rotation courte de cultures pures. L'autre recouvre différentes alternatives se référant à l'agroécologie (Encadré 1) : agriculture biologique (AB), agriculture de conservation des sols (ACS) et récemment agriculture régénératrice (AR). L'AB et l'ACS présentent des atouts mais ont chacune une limite majeure, respectivement le travail du sol et l'utilisation de pesticides (Encadré 1). L'agriculture régénératrice (AR) met en avant la santé du sol et les services associés (Giller et al., 2021), en plus d'être en AB selon certains, mais relevant du « greenwashing » pour d'autres (Tittone et al., 2022).

Ces trois formes d'agriculture ont en commun de considérer que tout ou partie des intrants de synthèse peuvent être remplacés par les services fournis par la biodiversité - on parle de services intrants - (Therond et Duru, 2019). En retour, des services à la société (entretien voire restauration des communs sol, eau, air, biodiversité) sont attendus sur la base des pratiques mises en œuvre (promesses), dont certaines sont vérifiables (par exemple moins de résidus de pesticides en AB).

Notre objectif est d'identifier des pistes pour dépasser les limites propres à chacune de ces trois formes d'agriculture, ou d'en préciser le contenu pour l'AR, et de montrer l'importance de contextualiser les recherches, les pratiques et les recommandations. C'est pourquoi nous présentons d'abord les acquis récents concernant la fourniture de services écosystémiques par le sol, puis définissons ce que pourrait être alors une agriculture régénératrice, basée sur la biodiversité et non majoritairement sur les intrants de synthèse. Nous présentons ensuite des indicateurs permettant de la mettre en œuvre en situation de transition ou de croisière. Au final, l'enjeu est de s'assurer, au travers d'indicateurs et de référentiels, que ces formes d'agriculture, dont la mise en œuvre est très dépendante des contextes, dépassent le stade des principes et des promesses.

Encadré 1. Formes d'agriculture se référant à l'agroécologie (fig. 1)

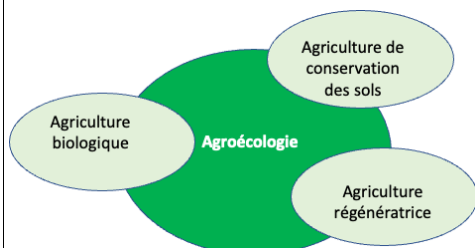


Figure 1 : Trois formes d'agriculture mobilisant des processus écologiques et se référant à l'agroécologie

L'agriculture biologique (AB) reste une référence, de par son histoire (presque un siècle), ses principes d'action (règles) et pratiques codifiées (réglementation), ses contrôles et certifications, son importance économique croissante et son identification par les consommateurs (Bellon et al., 2011). Elle repose sur un cahier des charges portant sur les intrants organiques, la biodiversité et le développement important des légumineuses et des cultures associées, ainsi que des promesses sur les services à la société (tableau 1) qui sont en partie vérifiables, notamment pour ce qui concerne la présence de résidus de pesticides dans les urines (Baudry et al., 2019). Cependant, les rendements sont généralement inférieurs à ceux de l'agriculture conventionnelle, pour partie du fait que les processus écologiques du sol ne sont pas toujours complètement mobilisés (Wilbois et Schmidt, 2019).

Forme d'agriculture	Pratiques agricoles			Biodiversité associée (d'après Duru et Therond, 2021)		Promesses de services à la société (d'après Duru et al. 2022)	
	Biodiversité planifiée (plantes dont légumineuses et agroforesterie)	Intrants de synthèse	Travail du sol	Dans les sols	Dans les paysages	Environnement	Qualité des produits
AB	Oui (principes)	Non (cahiers des charges)	Oui (souvent important pour le contrôle des adventices)	Promesse (pas de pesticides de synthèse)	Promesse par diversité des cultures	Biodiversité élevée et écotoxicité faible	Plus de nutriments et moins de contaminants
ACS	Couverture permanente du sol et rotation longue (principes)	Oui (autorisé)	Réduction/suppression du travail du sol (principe)	Promesse (pas de travail du sol et couverture permanente du sol)	Promesse par couverture permanente du sol ; diversité des couverts	Séquestration de carbone, régulation du cycle de l'eau et biodiversité élevée	Plus de nutriments (Duru, 2023) et parfois moins de contaminants
AR						Restauration des communs	

Tableau 1 : Principaux principes et promesses de trois formes d'agriculture se revendiquant de l'agroécologie

L'agriculture de conservation des sols (ACS) est née aux États-Unis dans les années 50 dans des régions de forte érosion. Elle avait pour but initial de protéger les sols, essentiellement par leur couverture. Elle a été officiellement définie par la FAO en 2001, comme reposant sur trois grands principes : (i) Couverture maximale des sols (faite de résidus de culture ou de couverts semés) ; (ii) Absence de travail du sol (seule la perturbation de la ligne de semis est tolérée) ; (iii) Diversification des espèces cultivées (rotations longues et cultures associées). La promesse est un agroécosystème dans lequel les régulations biologiques permettent de diminuer l'artificialisation du milieu (intrants, travail du sol), ce qui suppose des changements profonds dans la conduite des systèmes de culture par rapport à

l'agriculture conventionnelle⁴⁷.

L'agriculture régénératrice (AR), née elle aussi aux Etats Unis, met tout particulièrement en avant la protection du sol (sols toujours couverts par des plantes vivantes ou leurs résidus) pour "réparer ou agrader la terre". L'argument central porte sur la santé biologique des sols considérée comme menacée et se voyant attribuer des propriétés parfois mythiques. Elle repose beaucoup sur les principes de l'ACS, en mettant en avant la protection agroécologique des cultures, la gestion intégrée des nutriments, ainsi que l'agroforesterie, l'utilisation de biochar, l'association d'espèces et l'intégration culture-élevage (Burgess et al., 2019). Certains auteurs visent une agriculture régénératrice biologique (Gordon et al., 2023). D'autres alertent sur le risque de greenwashing, en particulier lorsque le concept est porté par les grands acteurs du système alimentaire (Giller et al., 2021 ; Duru et al., 2022 ; Titttonel et al., 2022). L'AR met plus en avant que l'ACS des promesses en termes de quantité de carbone séquestrable, d'amélioration des communs (eau et biodiversité), voire en termes de densité nutritionnelle des produits (Montgomery et al., 2022). Ces deux formes d'agriculture sont néanmoins confrontées à une difficulté : elles misent sur la biodiversité pour la fourniture de services alors qu'elles n'excluent pas les intrants de synthèse pouvant être préjudiciables à certaines de ses composantes.

Ces trois formes d'agriculture considèrent que la santé des sols est un maillon faible de l'agriculture conventionnelle. Le focus sur le sol est motivé par des diagnostics (Wood et al., 2000)⁴⁸, l'importance de l'érosion (Evans et al., 2020) ou la nécessité de séquestrer du carbone dans les sols pour faire face au réchauffement climatique (Murphy, 2020). En effet, la matière organique (MO) revêt une importance clef de par son effet sur la biologie des sols et son rôle dans les processus écologiques (structuration du sol, nutrition et protection des plantes, séquestration de carbone...) (Therond et Duru, 2019). La complexité de mise en œuvre provient du fait que les intrants, notamment industriels, y compris le travail du sol, ont des effets pouvant être négatifs sur la biodiversité associée dans les sols ou les paysages. Cette difficulté est réelle pour la conduite d'un système de culture en routine, et l'est bien plus encore lors de phases de transition pour passer d'une agriculture conventionnelle à une agriculture agroécologique.

La comparaison de ces trois formes d'agriculture montre que la biodiversité à l'échelle des paysages n'est jamais explicitement désignée (tableau 1), alors que de nombreux travaux de recherche montrent son importance, tant pour les régulations biologiques (rôle de la mosaïque paysagère) que pour la maîtrise des flux biogéochimiques (rôle des infrastructures écologiques). Ce niveau de biodiversité, qui joue un rôle clef pour la fourniture de services de régulation (Sirami et al., 2019 ; Petit et al., 2021) nécessite des réorganisations de parcelles et des choix d'assolement et de rotation souvent au-delà du périmètre d'une exploitation agricole, et n'est pas analysée dans la suite de ce papier.

Processus écologiques sous-jacents à la fourniture de services écosystémiques par le sol

Microorganismes, cycles biogéochimiques, nutrition et protection des plantes

Fonctions et santé du sol

Le sol est potentiellement le support d'une grande diversité d'habitats et d'organismes. Il agit comme un accumulateur, un transformateur et un milieu de transfert pour l'eau, le carbone, les radicaux azotés, phosphorés, soufrés, les sels minéraux, les ions métalliques.

La santé d'un sol est définie comme « sa capacité à fonctionner comme un système vivant clef pour soutenir la productivité biologique, promouvoir la qualité de l'environnement et maintenir la santé des plantes et des animaux » (Doran et Zeiss, 2000). Les processus physiques et chimiques qui contribuent à la santé du sol sont fortement liés aux activités des organismes du sol ainsi qu'à la structure et au fonctionnement des racines, fournissant des services écosystémiques (Abbott et Manning, 2015).

⁴⁷ <https://www.inrae.fr/actualites/dossier-lagriculture-conservation>

⁴⁸ Sur la base de 250 analyses de sol en France, il a été montré que si 32% étaient dans un état satisfaisant, jusqu'à 10% étaient dépréciés en termes d'abondance de microorganismes, le reste ayant un niveau correct mais à surveiller <https://www.youtube.com/watch?v=gym0m21Kw>

Les organismes du sol utilisent comme principale ressource énergétique les exsudats racinaires (entre 20 et 40% du carbone issu de la photosynthèse sont exsudés sous forme d'hydrates de carbone liquides) et les résidus de culture. Ces exsudats représentent un « carburant » rapidement et facilement assimilé par de nombreux organismes. Ils stimulent le développement et la prolifération de ces derniers tout autour de la racine. En retour, les microorganismes stimulent l'exsudation (Lebeis et al., 2015) et élicitent des réactions de la plante-hôte (Pieterse et al., 2014) permettant le développement de véritables chaînes alimentaires avec les bactéries (plus rapides à se multiplier) puis les champignons (Jacoby et al., 2017). Viennent ensuite les consommateurs tels les protozoaires et vers de terre, puis les consommateurs secondaires comme les collemboles et acariens. Tous ces organismes contribuent aux processus d'agrégation et donc au maintien de la structure du sol.

Relations sol-plantes-microorganismes

Les microorganismes participent à la nutrition des plantes. Les mycorhizes, champignons filamenteux vivant en symbiose avec les plantes, permettent de capter l'eau, l'azote et autres nutriments en explorant le sol au-delà des racines. Ils contribuent à la solubilisation du phosphore, facilitant ainsi son absorption par la plante, et à la synthèse de substances de croissance. Des bactéries, du genre *Rhizobium*, permettent la fixation de l'azote de l'air par symbiose avec les légumineuses, qui leur fournissent l'énergie nécessaire. Il existe aussi une fixation libre par des bactéries du sol, du genre *Azotobacter* entre autres, qui tirent leur énergie de la décomposition de résidus végétaux carbonés.

Les microorganismes participent à la régulation de la qualité de l'eau, à la rétention et disponibilité des nutriments ainsi qu'à la stabilité structurale du sol (Adhikari et Hartemink, 2016). Ils jouent aussi un rôle important dans la séquestration du carbone dans des pools stables ; la nécromasse microbienne y contribuant à près de la moitié en particulier dans les sols à forte abondance fongique (Khangura et al., 2023) et forte teneur en argile (Kirschbaum et al., 2020). Cela implique de mettre en œuvre des pratiques favorisant la biomasse microbienne, en particulier des champignons mycorrhiziens qui ont la capacité d'utiliser le « carbone liquide » provenant des exsudats racinaires, mais aussi de limiter le lessivage des particules fines du sol (argiles) en favorisant leur agrégation. La glomaline, produite dans les parois cellulaires des hyphes des champignons mycorrhiziens, agit justement à la fois comme un entrepôt de carbone et comme un stabilisateur des agrégats, en favorisant leur formation. Plus globalement, la contribution des microorganismes au stockage du carbone dans les sols est imagée par le concept de « pompe microbienne à carbone ». C'est un formalisme conceptualisant la séquestration du carbone pour des formes stables via l'accumulation de composés organiques résultant de l'anabolisme des microbes du sol (Liang, 2020). Néanmoins, le stockage de carbone stable peut aussi provenir exclusivement des végétaux, lorsqu'il s'agit de composés carbonés difficilement décomposables tels certains polyphénols (lignine, hémicellulose, tanins par exemple - Derrien et al., 2023), ou encore de la formation de carbone très stable par pyrolyse lors des incendies (charbon et carbone noir notamment). Les microorganismes contribuent aussi à la rhizodéposition azotée (Fustec et al., 2010). *In fine*, la biodiversité et les cycles biogéochimiques auxquels les microorganismes participent sont des facteurs clés pour la fourniture de services écosystémiques par les sols (Smith et al., 2015).

Rôle des micro-organismes pour la santé des plantes

Les microorganismes du sol sont efficaces pour dégrader et détoxifier les composés organiques et inorganiques, appliqués délibérément (pesticides) ou non. Par exemple, certaines souches bactériennes de *Pseudomonas* sont capables de dégrader des insecticides neurotoxiques organophosphorés ou carbamates (Gregory et al., 2015) ; des bactéries *Rhizobium* peuvent dégrader le glyphosate (Masotti et al., 2023).

La diversité des microbes associés aux racines est également cruciale pour la santé des plantes. Les plantes peuvent façonner le microbiome de la rhizosphère. Lors d'une attaque d'agents

pathogènes ou d'invertébrés ravageurs, elles peuvent aussi recruter des microorganismes protecteurs spécifiques (Berendsen et al., 2012), qui produisent des antibiotiques naturels ou encore des éliciteurs, renforçant la capacité des plantes à se défendre contre les bioagresseurs. Les pratiques qui favorisent la santé des sols doivent généralement leurs effets bénéfiques sur les maladies transmises par le sol au fait qu'elles augmentent l'activité et la diversité de la biomasse microbienne du sol, entraînant un meilleur contrôle biologique des agents pathogènes par leurs antagonistes (Nielsen et al., 2015).

Le potentiel rédox, clef de voûte des processus écologiques

Construction d'un référentiel

La thermodynamique a montré dès la fin des années 1940 que les différentes formes des éléments dépendaient du pH et du potentiel d'oxydation-réduction (potentiel redox noté Eh). Ce référentiel peut dès lors être utilisé pour comprendre la solubilité des éléments minéraux sur des diagrammes pH-Eh (dits diagrammes de Pourbaix), pour une concentration et une température données (Encadré 2).

Encadré 2 : Potentiel d'oxydo-réduction et la notion d'oxydation en électrochimie et en chimie organique
 A l'image des réactions acido-basiques qui correspondent à des échanges de protons, en électrochimie les réactions d'oxydoréduction correspondent à des échanges d'électrons. Elles se font entre un élément oxydant qui gagne des électrons et un réducteur qui donne ses électrons. De la même manière qu'un milieu riche en protons est acide et a un pH bas, plus il est réduit/réducteur, plus il a tendance à céder des électrons, plus son potentiel redox est bas et plus il a d'énergie. Inversement, un milieu pauvre en protons est alcalin et a un pH élevé, et plus un système est oxydé/oxydant, plus il est apte à capter des électrons, plus son potentiel d'oxydo-réduction (Eh) est élevé, et moins il a d'énergie (figure 2). Toutefois, pH et Eh ne sont pas indépendants : de nombreuses réactions d'oxydo-réduction impliquent des échanges de protons. En particulier, de l'eau qui perd des électrons forme de l'O₂ et des protons et en conséquence, l'oxydation conduit à l'acidification. De ce fait, en chimie organique, et donc en biologie, l'oxydation est mieux caractérisée par le gain d'oxygène ou la perte d'hydrogène que par la « simple » perte d'électron (figure 2) (Husson et al., 2016 ; Husson, 2023).

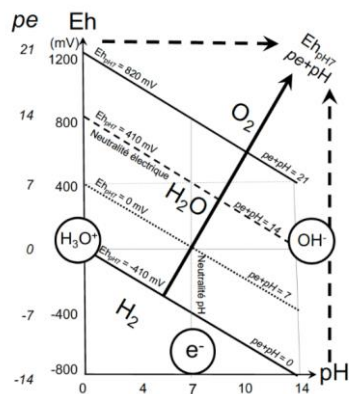


Figure 2 : Caractérisation de l'oxydation au sens biologique par le pe+pH sur un diagramme pH-Eh (adapté de Husson, 2023).

Le gain d'oxygène ou la perte d'hydrogène sont caractérisés par la notion de Eh_{pH7} ou de pe+pH, le pe (potentiel électronique) étant calculé à partir de Eh (à 25°C, $pe = Eh \text{ (en mV)} / 59$). L'eau, sur laquelle repose la vie, n'est stable qu'entre les lignes $pe+pH = 0$, en dessous de laquelle seul le dihydrogène est stable et la ligne $pe+pH=21$, au-dessus de laquelle seul le dioxygène est stable. La neutralité électrique correspond à la ligne $pe+pH = 14$.

Plus récemment, les études en physiologie végétale ont montré que des signaux redox et le maintien dynamique des équilibres Eh-pH sont à la base de tous les processus de régulation du métabolisme et du développement des plantes. En fait, tous les êtres vivants se développent dans une gamme de pH-Eh spécifique qu'ils doivent impérativement maintenir au niveau cellulaire, en particulier au niveau des mitochondries, la centrale énergétique (Rabotnova et Schwartz, 1962 ; Husson et al., 2021). Pour maintenir cet équilibre pH-Eh dans les cellules, les plantes ont recours à des tampons chimiques à court terme, à l'activation de gènes pour la formation de protéines à moyen terme, et elles « évacuent » les produits très oxydés/acides dans les parois pour préserver les cellules. Mais elles contrôlent aussi le milieu extérieur au niveau de la rhizosphère en exsudant des composés qui modifient pH et Eh et activent/ nourrissent la microflore qui contribue également à corriger ce milieu extérieur. Ainsi les racines des plantes cherchent à maintenir un environnement proche de la neutralité acide/base et électrique (légèrement acide et réduit) (Husson, 2013). La photosynthèse est une réduction du CO₂ de l'air en sucres. Il s'agit de la réduction primaire, à l'origine de toute l'énergie utilisée dans le fonctionnement des écosystèmes (y compris ceux des Hommes lorsqu'ils recourent aux énergies fossiles). La plante peut ainsi être vue comme une véritable pile à hydrogène : lors de la première étape de la photosynthèse, l'énergie des photons est utilisée pour dissocier l'eau en O₂ (libéré dans l'atmosphère), protons et électrons. L'énergie de ces protons et électrons est alors « stockée » (en particulier sous forme d'hydrogène) sur des chaînes carbonées (sucres) qui seront utilisées dans le processus inverse (l'oxydation via la respiration) dans les mitochondries pour récupérer l'énergie nécessaire au métabolisme. Ainsi, les plantes jouent le rôle de panneaux solaires qui « se rechargent » et « rechargent » le sol en électrons et en protons. Cela se fait soit par les racines (exsudation racinaire), soit par les apports en surface et dans le sol quand elles se décomposent. Cette énergie stockée dans les MO, mortes (humus), ou vivantes (micro-organismes et racines) est utilisée pour la croissance des plantes et des micro-organismes mais aussi pour la nutrition de la méso- et de la macrofaune. Toute baisse de la production photosynthétique entraîne donc une baisse de l'énergie disponible pour le bon fonctionnement du système dans son ensemble, ce qui impacte fortement les cycles biogéochimiques, la nutrition des plantes mais aussi leur sensibilité aux bioagresseurs.

Eh-pH du sol, nutrition des plantes et cycles biogéochimiques

Les matières organiques jouent un rôle clef dans les processus d'oxydation : elles impactent le pH (le ramenant proche de la neutralité) et le Eh du sol (la MO étant un réservoir d'électrons, elles baissent le potentiel redox et le tamponne) ; inversement, le niveau d'oxydation du sol impacte la minéralisation et les processus d'humification. La minéralisation est d'autant plus rapide que le sol est oxydé, et en conséquence l'humification est faible (Husson, 2013). Il importe cependant de distinguer la MO bioactive, accessible aux microorganismes et qui constitue le réservoir d'électrons facilement disponibles, de la MO très stable qui améliore la structure du sol et sa capacité à tamponner les fluctuations redox par sa capacité à accepter ou à donner un grand nombre d'électrons via les microorganismes.

Lorsqu'un sol a une faible teneur en MO, il est oxydé et manque d'électrons. La plante doit le « recharger » par les racines. Pour cela, elle transporte des produits de la photosynthèse au niveau des racines pour les relarguer et ainsi « corriger » son environnement avec l'aide des micro-organismes. Ce processus a un coût énergétique important et se fait au détriment de la croissance, limitant ainsi sa capacité de production photosynthétique, et donc de réduction. On entre alors dans un cercle vicieux : moins il y a d'électrons dans le sol, plus la plante doit en relarguer pour fonctionner, mais moins elle produit de feuilles et moins elle sera capable de relarguer des électrons dans le sol. À moyen/long terme, les retours de biomasse au sol diminuent et cette biomasse est rapidement oxydée (minéralisation rapide dans un sol oxydé), ce qui amplifie la tendance à l'oxydation du sol (Husson et al., 2021 ; Husson, 2023).

Ce cercle vicieux est également amplifié par le fait que les conditions pH-Eh du sol déterminent les formes des différents éléments. La solubilité et l'absorption des éléments nutritifs et des éléments traces sont modifiées, entraînant des risques de carence (en particulier en fer et manganèse) et de

toxicité qui conduisent à une baisse de la photosynthèse. De plus, dans un tel sol, l'azote se trouve essentiellement sous sa forme oxydée, le nitrate (NO_3^- , très mobile) alors qu'en milieu réduit, il est essentiellement sous sa forme réduite d'ammonium (NH_4^+ peu mobile mais toxique pour la plante en grande quantité) ou sous forme organique. Des conditions de sol oxydé entraînent donc un risque de pertes des ions nitrate par lixiviation et pollution des nappes, ainsi qu'une dépense énergétique supplémentaire pour la plante qui, absorbant de l'azote oxydé, devra le réduire à l'intérieur de son système pour fabriquer les acides aminés. De plus, une plante absorbant des nitrates s'alcalinise fortement (ainsi que sa rhizosphère) et inversement une plante qui absorbe de l'ammonium s'acidifie fortement, la chute de pH favorisant la solubilisation de l'aluminium, pouvant entraîner une toxicité. Les plantes, quand elles en ont la possibilité, absorbent donc en quantités proches nitrate et ammonium, évitant ainsi de se déséquilibrer en pH et de s'oxyder ; la régulation du pH demandant de faire fonctionner des pompes ATP-protons qui consomment de l'énergie et oxydent. Enfin, la fixation d'azote atmosphérique (réduction du N_2 en NH_3) par les bactéries diazotrophes comme *Azospirillum spp* est gouvernée par le potentiel redox, le pH et la matière organique du sol, leur activité étant supérieure à pH légèrement acide (6,6) et à potentiel redox bas (-50 à -150 mV, Charyulu et Rajaramamohan R, 1980), des conditions microaérobies (réduites) étant nécessaires au fonctionnement de la nitrogénase. Une revue récente (Mandon et al., 2021) montre le rôle clef de l'adaptation des bactéries endophytes (*Azotobacter sp*, *Azospirillum spp*, *Bacillus sp*, *Cyanobacteria sp*, ...) et endosymbiotiques (*Rhizobia sp*, *Frankia sp*, ...) aux espèces réactives à l'oxygène associées au stress abiotique ou produits par la plante hôte, qui détermine l'issue de l'interaction plante-bactérie.

La pire des situations est sans doute celle de sols dégradés, à faibles taux de MO et d'activité biologique, et ayant une mauvaise structure (compactés, peu drainants). Dans ce cas, les plantes passent en quelques jours de conditions très fortement réduites et asphyxiantes, après engorgement, à très fortement oxydées après assèchement, et donc d'une nutrition en azote minéral fluctuant très rapidement de tout nitrate à tout ammonium. Il leur est très difficile de maintenir leur équilibre pH et redox dans de telles conditions. La baisse de l'énergie captée par photosynthèse ne permet alors pas d'entretenir les processus d'agrégation et conduit dans un nouveau cercle vicieux à la destruction des sols, amplifiée par les périodes d'engorgement (Husson, 2013 ; Husson et al., 2021, Husson, 2023).

Les plantes utilisent la très forte capacité des micro-organismes à réguler les conditions Eh-pH de leur environnement, en particulier à travers la production de biofilms et plus généralement par la consommation d'oxygène pour leur respiration et la production d'antioxydants. A l'inverse, les conditions Eh-pH du milieu sont un des principaux facteurs de la dynamique des populations de microorganismes. Les plantes, via l'exsudation, modifient les conditions Eh-pH de leur environnement pour favoriser et alimenter de manière sélective certaines populations de microorganismes, leur permettant ainsi de maintenir à moindre coût des conditions Eh-pH qui leur sont favorables (Husson, 2013 ; Husson et al., 2021).

Eh-pH, bioagresseurs et santé des plantes

Les microorganismes pathogènes ont généralement une gamme pH-Eh de développement restreinte (Rabotnova, 1959). Sur ces bases, il a été établi une « cartographie » des conditions pH-Eh favorables à divers types de bioagresseurs (fig 3). Ainsi, les champignons phytopathogènes se développent (dans le milieu extracellulaire ou apoplaste) dans des conditions très acides et oxydées (1), pour les champignons nécrotrophes (souvent telluriques), ou acides et oxydées (2) pour les champignons biotrophes (souvent aériens). Certains champignons qui se développent dans le xylème (*Verticillium spp.*) ou dans le phloème (*Colletotrichum spp.*) se retrouvent à pH neutre ou légèrement alcalin (3). Les bactéries phytopathogènes se développent dans des conditions principalement aérobies ou éventuellement pseudoaérobies ($\text{pe}+\text{pH}>10$), de pH légèrement acide (2) pour celles se développant dans l'apoplaste (*Xanthomonas spp.*, *Pseudomonas spp.* etc.), neutre à légèrement alcalin (3) pour celles se développant dans le xylème (*Xylella spp.* etc.) ou alcalin (4) pour celles se développant dans le phloème (*Candidatus Liberibacter spp.* etc.).

Les virus phytopathogènes se développent quant à eux dans des conditions alcalines (dans le phloème), à Eh relativement bas (4), mais qui correspond à des conditions de phloème oxydées. Etant donné que le phloème est très tamponné, cela correspond à des conditions d'une plante très oxydée. Dans tous les cas, ces pathogènes se développent dans des conditions de plantes oxydées. Les oomycètes se développent dans des conditions légèrement oxydées, à des pH très spécifiques (5).

On retrouve le même schéma pour les insectes qui « préfèrent » des plantes oxydées, en relation avec les conditions de fonctionnement de leurs enzymes dans le mésentéron : très alcalin pour les piqueurs-suceurs (4) du phloème, moins alcalin pour les piqueurs-suceurs du xylème (3), plus acide pour les phytophages (1 et 2). Comme pour les organismes pathogènes, les insectes attaquent donc de préférence des plantes oxydées, ayant subi des stress variés. En effet, l'ensemble des stress abiotiques ou biotiques se traduisent en stress oxydatifs et modifient les valeurs Eh-pH des différents compartiments de la plante. On comprend mieux aussi que les stress qui font baisser la photosynthèse (froid, ombrage, carences y compris hydrique, etc.) conduisent à une oxydation de la plante et favorisent ainsi les pathogènes de type virus et champignons (Husson et al., 2021). On comprend également que les plantes capables de maintenir leur homéostasie Eh-pH à $pe+pH < 9$, c'est-à-dire des conditions réduites et acides dans l'apoplaste (6), réduites et neutres dans le xylème (7) et réduites et alcalines dans le phloème (8), sont peu sensibles aux maladies et aux ravageurs.

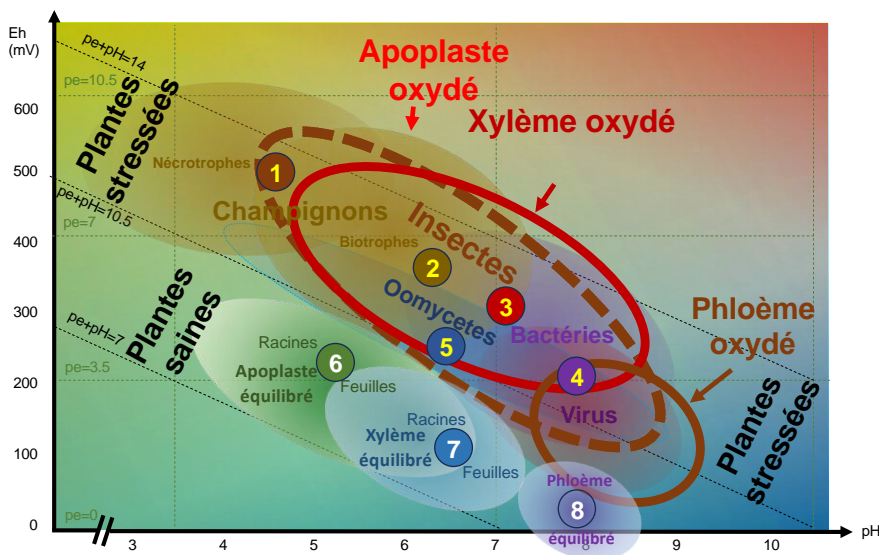


Fig 3. Conditions Eh-pH d'équilibre dans les différents compartiments des plantes et conditions Eh-pH optimales pour le développement/attaques des différents types de bioagresseurs (d'après Husson et al., 2021).

Vers une vision holistique de la santé des sols

Les systèmes reposant sur des pratiques globalement oxydantes - sol nu, souvent déstructuré par le travail du sol, usage de pesticides et d'engrais minéraux pour la grande majorité oxydants, s'ajoutant à une faible diversité des cultures et une activité biologique réduite - nécessitent des apports d'intrants élevés générant des émissions de polluants (organiques et inorganiques) dans l'eau et l'air. Ils fournissent peu de services écosystémiques et conduisent aussi à une oxydation des plantes qui deviennent de ce fait sensibles aux bioagresseurs (tableau 2). La protection des

cultures consiste alors à accompagner la plante dans son mode de lutte, i.e. par suroxydation via les pesticides.

A l'inverse, les systèmes reposant sur la biodiversité planifiée (cultures et couverts végétaux), des apports d'intrants de synthèse réduits et bien ciblés (par exemple des apports d'oligo-éléments) et sur une réduction du travail du sol, créent des conditions optimales en termes d'équilibres pH-Eh qui sont défavorables aux bioagresseurs (sols dits « suppressifs ») et qui au contraire fournissent des services à l'agriculture et à la société. Ils reposent sur une activité biologique intense (Bender et al., 2016) permise par des teneurs élevées en MO entretenues grâce aux apports d'une photosynthèse maximisée dans des sols équilibrés.

Pratiques de gestion	Sol nu, compacté Travail du sol Fertilisants et pesticides de synthèse pour la nutrition et la protection des cultures	Sol protégé (couverts végétaux) et bien structuré Rotations longues Perturbations du sol réduites Apports organiques et réduction des apports d'intrants de synthèse
Caractéristiques chimiques du sol	Sols oxydants Favorisation dans un 1 ^{er} temps des bioagresseurs par fluctuations fortes dans les sols conduisant à l'oxydation des plantes. Contrôle des pathogènes dans un 2 nd temps par suroxydation provoquée par les pesticides	Sols réducteurs , équilibrant pH et Eh Protection agroécologique des cultures (homéostasie du couple Eh-pH)
Caractéristiques biologiques du sol	Diversité des microorganismes du sol faible Pathogènes favorisés (théorie de niche écologique vacante)	Diversité des microorganismes du sol élevée Séquestration de carbone Fourniture de nutriments Contrôle des bioagresseurs

Tableau 2 Pratiques de gestion adaptées aux caractéristiques chimiques (Husson et al., 2021) et biologiques (Khangura et al., 2023) des sols

Les pratiques centrées sur les plantes ont assimilé leurs déficits en éléments nutritifs à ceux d'écosystèmes entiers, ignorant ainsi le rôle important des organismes hétérotrophes responsables de la décomposition des résidus organiques dans le stockage du carbone des écosystèmes, sous forme d'humus riche en éléments nutritifs variés. Pour intégrer véritablement les cycles du carbone et des éléments nutritifs aux pratiques culturales, il faut donc tenir compte du fait que la productivité secondaire des communautés hétérotrophes est intrinsèquement limitée en sources carbonées riches en énergie (Soong et al., 2020). En conséquence, la gestion écologique consiste à conserver ou le plus souvent à améliorer les pools de nutriments auxquels les plantes peuvent accéder (MO et biomasse microbienne) tout en favorisant leur rétention et leur cycle interne. En outre, cela améliore l'efficacité de la transformation de la MO fraîche (résidus de cultures et couverts, fumier) en humus stable, grâce au meilleur respect des équilibres stoechiométriques, c'est-à-dire un meilleur équilibre des proportions dans lesquelles les différents nutriments doivent être présents, un ratio C : N : P : S optimum pour l'humification se situant à 10000 : 833 : 200 : 143. (Kirkby et al., 2013, 2014). En particulier les organismes décomposeurs augmentant avec le ratio C:N, l'humification est plus importante sur des substrats avec un ratio C:N bas (Nicolardot et al., 2001)

L'approche du fonctionnement du système sol-plantes-microorganismes par le couple Eh-pH, permet de définir cinq grands types de pratiques agricoles qui impactent les conditions électrochimiques des sols, temporairement ou plus durablement :

i) des amendements calciques ou magnésiens peuvent être apportés (chaux, calcaire, dolomie) pour augmenter le pH des sols acides. Les amendements organiques ont un impact plus durable de régulation du Eh et du pH, en jouant également sur la structuration du sol ;

ii) l'irrigation ou le drainage, quand ils sont possibles, impactent fortement et à court terme les conditions Eh, la diffusion de l'oxygène dans l'eau étant 10 000 fois plus lente que dans l'air ;

iii) le travail du sol, de même que les charrois et passage d'engins, impactent Eh et pH, principalement du fait de l'altération de la structure du sol. La densité apparente du sol (*i.e.* sa masse volumique) et la taille des agrégats influencent fortement la profondeur à laquelle l'oxygène diffuse. Le travail du sol impacte aussi la continuité des pores, positivement à court terme mais négativement à moyen terme (et d'autant plus vite que la stabilité structurale des agrégats est faible), ce qui conduit à des conditions anoxiques, néfastes pour les plantes, en conditions humides ;

iv) le type de plantes cultivées et leur séquence dans les rotations ont une forte influence sur Eh et pH du sol car la production de biomasse et les quantités restituées au sol impactent fortement sa teneur en MO, laquelle constitue le réservoir d'électrons et tamponne les fluctuations Eh et pH du sol. En particulier, il sera intéressant de prendre en considération les stratégies d'utilisation des ressources des différentes plantes : les plantes ayant une stratégie de conservation de ressources, caractérisées par une croissance assez lente, des racines à C/N élevé et une faible exsudation racinaire (de composés riches en acides aminés), mobilisent un microbiote différent des plantes de type « exploitatrices ». Ces dernières, à croissance plus rapide, à forte photosynthèse et forte exsudation racinaire de composés à C/N plus bas (métabolites primaires : sucres, acides organiques), favorisent un microbiote avec plus de taxons impliqués dans la minéralisation de la matière organique par « priming effect » (Guyonnet et al. 2018).

v) la ré-intégration de l'élevage, en particulier de ruminants puisque la transformation de la matière organique dans le rumen permet d'enrichir le sol en taxons anaérobies, et de modifier la transformation de la matière organique.

D'une manière générale, toutes les techniques agricoles qui favorisent le non-retournement du sol, la couverture végétale vivante et la restitution d'importantes quantités de biomasse au sol favorisent le développement d'une structure stable et des conditions d'oxydo-réduction équilibrées. Elles permettent avant tout d'obtenir une grande diversité de niches Eh-pH dans l'espace et de faibles fluctuations dans le temps.

Cette perspective « redox » permet ainsi d'envisager une gestion agroécologique des bioagresseurs en maintenant la plante dans un état d'équilibre (légèrement acide et réduit) défavorable à ces derniers. Cela permet de passer d'une approche curative de lutte (chimique) contre les bioagresseurs par destruction, à une approche prophylactique de prévention par maintien dynamique de l'homéostasie Eh-pH de la plante, du niveau cellulaire aux niveaux tissulaire et plante entière. Cette stratégie nécessite cependant une reconception des systèmes de culture, reconception fondamentalement basée sur le nouveau paradigme donnant priorité à la photosynthèse comme source essentielle d'énergie pour le système sol-plante, en opposition au paradigme courant qui donne la priorité aux apports d'énergie exogène au système, via tous les intrants industriels dont l'énergie mécanique.

Mettre en œuvre une agriculture régénératrice

De nouveaux indicateurs pour piloter la santé du sol

La variabilité dans les relations entre les diverses dimensions de la biodiversité et les services écosystémiques, n'autorise pas de recommandations normalisées, mais simplement l'édiction de principes. La généralisation de résultats de recherches très contextualisées ou d'observations empiriques, est donc abusive et malheureusement fréquente. Ainsi, des systèmes de culture ou des itinéraires techniques à mettre en œuvre vont dépendre très largement de l'état de santé des

sols et des conditions climatiques locales. C'est pourquoi, il importe de pouvoir situer l'état de fertilité endogène des sols⁴⁹ sur des trajectoires, et pour cela, de savoir comment maintenir ou le plus souvent restaurer cette fertilité suite à une agriculture minière ayant conduit à une perte de carbone et d'activité biologique. On parle alors d'agriculture régénératrice ou de régénération.

Les connaissances présentées ici permettent de définir des repères génériques pour mettre en œuvre les pratiques afin de réduire les intrants de synthèse.

L'état de santé des sols peut être évalué par divers indicateurs liés à leur activité biologique ou à leurs caractéristiques physico-chimiques, et aussi plus simplement par des indicateurs intégratifs issus d'une évaluation visuelle de leur structure (notamment l'indicateur VESS : encadré 3) ou correspondant au ratio MO%/argiles%, deux proxys qui fonctionnent bien pour les sols contenant de 10 à 40% d'argiles (Johannes et al., 2017), soit la majorité des zones cultivées en France. Notons qu'un nouvel indicateur, proche du précédent, basé sur le carbone organique du sol (COS)⁵⁰ vient d'être proposé (Poeplau et Don, 2023). Il s'agit du ratio COS% réel/COS% attendu, censé donner moins d'importance aux argiles et être bien corrélé à la densité apparente. Il nécessite encore d'être testé à large échelle pour améliorer et étendre son domaine de validité.

Encadré 3- Le test VESS (Evaluation Visuelle de la qualité de la Structure du Sol) est une méthode de test bêche servant à déterminer la qualité des sols (SQ) en se basant sur les agrégats et la porosité observables le plus longtemps possible après tout travail du sol. En attribuant une note de 1 (SQ1 : friable) à 5 (SQ5 : très compact), ce test permet de comparer la structure des sols de différentes parcelles et exploitations⁵¹. La dégradation des sols d'un VESS SQ1 à SQ3 correspond avant tout à une perte de MO et de macroporosité structurelle. De SQ3 à SQ5, on observe un effondrement de la structure, par compaction, avec très forte dégradation des propriétés hydrostructurelles (Johannes et al., 2017).

Un VESS SQ1, correspondant à un ratio MO%/argiles% supérieur à 24% , caractérise un sol régénéré (① sur la fig. 4), très bien structuré, à l'activité biologique riche et diversifiée, capable d'assurer un grand nombre de services écosystémiques. Ce ratio de 24% correspond à un premier seuil dans une dynamique de dégradation, et inversement à un seuil 'ultime' de régénération des sols grâce à un gain de porosité biologique via un gain de MO. A l'opposé, un VESS SQ5 (⑤ sur la fig. 4, ratio MO%/argiles% inférieur à 12%) caractérise un sol très compact suite à un effondrement de la structure, et siège de très peu de services écosystémiques. La valeur de 12% correspondant à un seuil ultime dans une dynamique de dégradation du fait d'une perte continue de MO entraînant celle de la porosité biologique, mais à un premier seuil dans une dynamique de régénération de sols très fortement dégradés.

Le ratio MO%/argiles% de 17% correspond à un seuil critique intermédiaire, point d'inflexion de la courbe (fig. 4) : au-delà, divers processus écologiques se mettent progressivement en place (régénération), en-deça, ils sont au contraire progressivement désactivés (dégradation).

Dans une dynamique de régénération des sols (progression de 17% vers 24%), les notes décroissantes traduisent une restauration de la structure via un gain de MO, ce qui permet de remobiliser des services écosystémiques pour la production et l'entretien de l'écosystème, et ainsi de limiter les besoins en intrants exogènes grâce à une fertilité endogène restaurée (fig. 4), (Johannes et al., 2017). Inversement, dans une dynamique de dégradation (progression de 17% vers

⁴⁹ La notion de fertilité endogène d'un sol rejoint celle de sa santé dans la mesure où il est question dans les deux cas de sa capacité à fonctionner sur le long terme comme un système vivant capable d'assurer une productivité de biomasse végétale compatible avec le maintien à long terme également des fonctionnalités écologiques de l'écosystème cultivé (contribution à la préservation des ressources air, eau, sol et biodiversité, et à la santé globale). Productivité primaire et autres fonctionnalités sont très dépendantes des interactions entre les caractéristiques biologiques, physiques et chimiques du sol.

⁵⁰ La matière organique du sol (MOS) contenant en moyenne 58% de carbone, le facteur multiplicatif entre le COS et la MOS est de 1,72

⁵¹ <https://agronomie.asso.fr/ae5-9-2-7>

12%), les notes croissantes révèlent une détérioration de la structure et donc de la fertilité endogène, faisant que le sol rend de moins en moins de services écosystémiques, et que l'agrosystème va devoir reposer largement sur des apports exogènes.

Ainsi, ces seuils, au sein d'un continuum, peuvent être utilisés pour caractériser les conditions de milieu déterminant les potentialités des systèmes et des pratiques, et les contraintes technico-économiques pour leur mise en place.

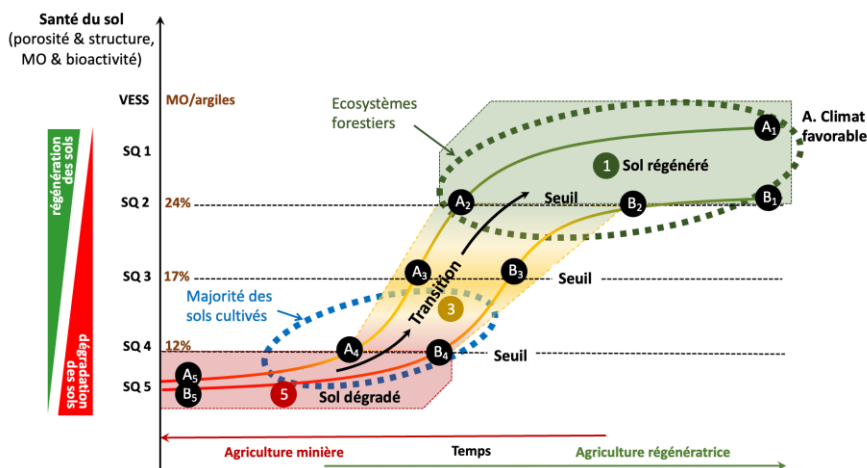


Fig. 4 Trajectoires de restauration ou de dégradation, caractérisation de l'état de santé des sols et seuils critiques, selon deux types de climat.

Les hypothèses de travail sur lesquelles s'appuient nos propositions sont que les trajectoires d'évolution des sols ne sont pas linéaires mais sigmoïdales, plus ou moins selon les types de sol et les climats. En climat favorable (climat A : pluviométrie importante et régulière, températures élevées mais pas extrêmes), les évolutions de sol seraient rapides. En climat contraignant (climat B : faible pluviométrie, longue saison sèche, températures extrêmes), les sols évolueraient plus lentement (fig. 4).

Ces hypothèses sont étayées par différents constats et par la compréhension des processus en jeu, en particulier sous l'éclairage d'une approche « redox ». Faisant en effet le constat que toute l'énergie de l'agroécosystème provient de la photosynthèse, l'étude de l'acquisition et de l'allocation de l'énergie disponible permet de comprendre que :

i) plus le sol est dégradé (peu de matières organiques, sol compacté, faible réserve en eau, blocages chimiques d'éléments nutritifs, etc.), plus la plante manque précocément d'énergie au cours de son développement, et donc plus elle recentre son allocation d'énergie sur les fonctions indispensables à sa survie immédiate (prospéction pour l'eau et les éléments nutritifs, solubilisation et absorption des éléments nutritifs, restructuration du sol) ; sa survie à court ou moyen terme est hypothéquée puisque ses processus d'auto-défense contre pathogènes et ravageurs, consommateurs d'énergie (pour les métabolites secondaires), sont réduits ;

ii) moins la plante a d'énergie, moins elle peut en allouer à la production de nouvelles feuilles (capacité photosynthétique entravée) et donc moins elle est productive (cercle vicieux car rétroaction positive). A l'inverse, plus le sol est dégradé, moins les coûts de prospection/absorption pour la plante sont élevés en proportion, libérant ainsi de l'énergie qu'elle peut allouer à l'accroissement de sa capacité photosynthétique et à ses processus d'auto-défense. Elle peut alors accumuler plus d'énergie sur le moyen et long termes (cercle vertueux même si rétroaction

également positive) ;

iii) il existe donc un seuil, qui correspond à une production photosynthétique dépassant les dépenses énergétiques liées à l'entretien du système (et aux exportations), au-dessus duquel on entre dans des processus d'aggradation, et en dessous duquel on tombe dans des processus de dégradation.

Dans la pratique, la restauration des sols par les principes de l'agroécologie nécessite une période de transition ((3) sur la fig. 4), plus ou moins longue selon l'état du sol au moment du changement de pratiques, sachant que la grande majorité des sols cultivés correspond à des ratios MO%/argiles% inférieurs à 17%, voire très souvent inférieurs au seuil critique de 12%.

Les systèmes sont d'autant plus productifs, durables et de qualité que l'on se situe au-dessus du seuil de 17%. Ils correspondent alors à une production énergétique par photosynthèse supérieure aux dépenses énergétiques de fonctionnement du système (sous forme d'apports exogènes), tout en permettant des exportations raisonnables. Plus le taux MO%/argiles% est élevé, plus ces sols sont en bon état de santé, peu sensibles à l'érosion, à la compaction et au passage d'engins, et plus ils limitent les fluctuations des variables environnementales abiotiques (température, eau, Eh, pH etc.), offrant ainsi des conditions très favorables à la biodiversité et à la production. Un grand choix de systèmes et d'espèces cultivées y est disponible, et les possibilités d'implantation permettent une très forte couverture des sols. Le travail du sol et les apports exogènes ne seraient pas nécessaires. Ces sols sont suppressifs de nombreux bioagresseurs (surtout agents phytopathogènes et ravageurs), permettant une protection agroécologique des cultures à faible coût. Le risque d'échec y est limité, d'autant plus que le climat est favorable, ce qui permet d'assurer une forte rentabilité économique. Inversement, plus ce taux est faible, et de manière très marquée en dessous de 12%, moins ces sols sont productifs, moins ils tamponnent les conditions de milieu et plus ils sont sensibles à l'érosion, à la compaction et au passage d'engins. Ces passages de machines sont pourtant nécessaires pour le travail du sol et l'application des intrants exogènes (fertilisants, pesticides), devenus indispensables car permettant de maintenir un niveau de production tant qu'il est économiquement acceptable. Les risques d'échec élevés, associés au coût des intrants et à leur faible efficacité dans les conditions les plus dégradées, altèrent la rentabilité de ces systèmes, par ailleurs peu durables puisque leur impact environnemental est élevé.

Pendant la période nécessaire à la régénération des sols, il est possible d'aider les plantes à se maintenir dans des conditions d'équilibre Eh-pH défavorables aux bioagresseurs, notamment avec des pulvérisations foliaires préventives de produits antioxydants (acides humiques, vitamine C en particulier).

Comment régénérer les sols dégradés

Cette capacité à se positionner sur ces trajectoires devrait permettre de donner de la généralité aux résultats de recherche et aux recommandations techniques. Les quelques recherches empiriques existantes fournissent des pistes (de Tourdonnet, 2017), de même que les observations avisées de praticiens (Bucaille, 2020), mais elles devraient être évaluées avec les indicateurs que nous avons proposés⁵².

Pour les sols dégradés, qui représentent une bonne partie des sols cultivés⁵³, ou pour ceux qui ne fournissent pas le niveau de services écosystémiques à la hauteur des enjeux, la question n'est plus « comment gérer ces systèmes/adapter les pratiques à ces conditions ? », mais devient « comment régénérer les sols pour être en mesure d'assurer productivité, durabilité et rentabilité tout en

⁵² Voir vidéo <https://www.youtube.com/watch?v=fSQLwvNISIU>

⁵³ Sur une période de 30 ans, entre 1982 et 2012, environ trois quarts des communes françaises ont été concernées au moins une fois, par des coulées d'eau boueuse dues à l'érosion hydrique des sols, couvertes par des arrêtés de catastrophes naturelles ; 35% des surfaces perdent plus d'1t de terre par ha et par an (1 t correspond à environ 1 mm de sol sur 1 ha, nécessitant en moyenne 40 ans pour être formé – Reicosky, 2015).

assurant une protection agroécologique des cultures à faible impact environnemental ? ». Cette question transcende les trois formes d'agriculture agroécologique que nous avons décrites. D'où les propositions suivantes pour une agriculture régénératrice.

Le premier principe ne devrait pas être l'arrêt du travail du sol car ce travail est nécessaire à l'obtention de la macroporosité permettant l'implantation racinaire des cultures ou des couverts végétaux lorsque l'on commence la transition à partir d'un sol très dégradé ; il importerait plutôt de développer les associations/rotations des cultures avec des mélanges diversifiés d'espèces végétales afin d'utiliser tout le temps et l'espace disponibles et de maximiser la production photosynthétique. Ensuite, les pratiques ne peuvent pas être figées et doivent évoluer au cours du processus de régénération. Les questions principales deviennent alors : « comment adapter les systèmes de culture aux conditions de milieu en évolution ? », « à quels moments peut-on et doit-on réduire ou supprimer le travail du sol et l'utilisation d'intrants exogènes ? ». Nous présentons ci-dessous les principaux éléments de réponse génériques :

i) comme vu précédemment, plus on s'éloigne du point d'inflexion ($MO\%/argiles\% = 17\%$), plus les pentes sont faibles et donc plus les évolutions seraient longues et difficiles (fig. 4). Ainsi, le passage de A5 à A4 (a fortiori de B5 à B4), soit le franchissement du seuil de 12%, exige, notamment sous climat contraignant, des apports de MO extérieurs considérables ou la concentration de la biomasse sur une surface plus restreinte que celle qui l'a produite, avec par la suite extension progressive à toute la surface. Ces apports de ressources organiques sont complémentaires d'un travail du sol qui reste maintenu (pour la création de porosité mécanique) mais en privilégiant le trafic contrôlé pour limiter la compaction du sol. Pour maintenir un équilibre pH-Eh, les plantes peuvent être aidées au cours de cette phase de transition par exemple par des pulvérisations foliaires anti-oxydantes.

ii) Au-delà de ce seuil, l'évolution deviendrait plus rapide car moins difficile. La production de biomasse endogène (en particulier par les couverts végétaux) augmenterait en effet rapidement et permettrait de s'approcher puis de franchir le seuil de 17% (stade A3, ou B3). Le passage de A4 à A3 (ou de B4 à B3) puis de A3 à A2 (ou de B3 à B2) correspondrait ainsi à un gain important de MO et à une restauration de la structure. On aurait alors une régénération du sol rapide et relativement facile à obtenir (notamment sur la trajectoire A), les possibilités de cultures/systèmes et les facilités d'implantation augmentent, favorisant la production d'une biomasse importante permettant de poursuivre la dynamique jusqu'à A2 (ou B2) (seuil de 24%).

iii) Au-delà de ce seuil de 24%, il deviendrait difficile, notamment sous climat contraignant, d'augmenter le stock de carbone du sol, une large part de ce carbone étant du carbone labile du fait des liaisons MO-argiles quasiment saturées. Il n'est d'ailleurs pas utile de le faire car les gains de production seraient faibles alors que les « coûts » d'entretien de niveaux très élevés de MO deviennent considérables. Toutefois, Rowley et al. (2018) mettent en évidence l'importance de la richesse du sol en cations Ca^{2+} pour améliorer la stabilisation du carbone organique du sol.

Enseignements pour les agricultures agroécologiques

L'enjeu des agricultures agroécologiques est de produire en maximisant les services écosystémiques fournis par la biodiversité. Outre la diversité des cultures de rente et la couverture permanente du sol (gestion de la biodiversité planifiée), cela suppose de combiner de manières *ad hoc* le travail du sol et les intrants exogènes à l'exploitation, tout en les réduisant, compte tenu de leurs effets souvent négatifs sur la biodiversité. Il s'agit donc d'initier et d'accompagner des trajectoires de restauration. Cela constitue un défi car les pratiques à mettre en œuvre sont très dépendantes des contextes de sol (texture, mais aussi structure, états organique et calcique...), de climat et de contexte socio-économique. Il n'y a donc pas de recettes simples pour les définir.

La prise en compte du microbiome du sol est cruciale pour déjà démêler les relations variées et complexes que les pratiques de gestion du sol et d'apports d'intrants de synthèse entretiennent avec l'environnement biotique et abiotique (Hermans et al., 2023). L'approche par le couple pH-Eh

fournit un cadre générique de fonctionnement des systèmes sol/ plantes/ microorganismes/ macrofaune/ bioagresseurs. Elle permet de mieux comprendre que toute l'énergie du système vient de la photosynthèse, que certains éléments nutritifs sont solubilisés ou non, que les plantes malades sont des plantes oxydées du fait de conditions de sol compacté, nécessitant de l'énergie pour compenser/réguler. Elle constitue un profond changement de paradigme pour l'agriculture et particulièrement pour la gestion de la santé des cultures car elle propose une approche préventive de celle-ci, via une gestion agroécologique des bioagresseurs par maintien des équilibres pH-Eh. Ce nouveau paradigme explique pourquoi il est nécessaire d'accroître la teneur en MO des sols et de régénérer leur structure, et aboutit à la définition d'indicateurs permettant de suivre la restauration des sols.

Les formes d'agriculture revendiquant une parenté avec l'agroécologie ont tout intérêt à se saisir de ces approches encore en construction et des indicateurs associés pour se situer sur des trajectoires de restauration. C'est le cas de l'agriculture biologique pour mieux activer les fonctionnalités du sol et pour l'agriculture de conservation des sols afin d'aller plus loin dans la réduction des intrants de synthèse. L'agriculture régénératrice, fondée sur des processus écologiques pilotables par la gestion et éloignée de la vision simpliste répandue dans la société, a l'ambition de correspondre à ces trajectoires de progrès. La mobilisation des indicateurs de santé du sol, pour une contextualisation des pratiques, est la condition pour qu'elle ne se réduise pas à de simples promesses.

Remerciements

Nous remercions Nadine Andrieu et Christophe Naudin pour leurs suggestions constructives.

Références

- Abbott, L. K., & Manning, D. A., 2015. Soil health and related ecosystem services in organic agriculture. *Sustainable Agriculture Research*, 4(526-2016-37946).
- Adhikari, K., & Hartemink, A. E., 2016. Linking soils to ecosystem services - A global review. *Geoderma*, 262, 101–111. <http://doi.org/10.1016/j.geoderma.2015.08.009>
- Baudry, J., Debrauwer, L., Durand, G., Limon, G., Delcambre, A., Vidal, R., ... Kesse-Guyot, E., 2019. Urinary pesticide concentrations in French adults with low and high organic food consumption: results from the general population-based NutriNet-Santé. *Journal of Exposure Science and Environmental Epidemiology*, 29(3), 366–378.
- Beillouin, D., Ben-Ari, T., Malézieux, E., Seufert, V., & Makowski, D., 2021. Positive but variable effects of crop diversification on biodiversity and ecosystem services. *Global Change Biology*, 27(19), 4697–4710. <http://doi.org/10.1111/gcb.15747>
- Bellon, S., Lamine, C., Olivier, G., & Abreu, L. S. D., 2011. The relationships between organic farming and agroecology. 3rd ISOFAR Scientific Conference at the 17th IFOAM Organic World Congress 3rd ISOFAR Scientific Conference at the 17th IFOAM Organic World Congress
- Bender, S. F., Wagg, C., & van der Heijden, M. G. A., 2016. An Underground Revolution: Biodiversity and Soil Ecological Engineering for Agricultural Sustainability. *Trends in Ecology & Evolution*, 31(6), 440–452. <http://doi.org/10.1016/j.tree.2016.02.016>
- Bennett, A. J., Bending, G. D., Chandler, D., Hilton, S., Mills, P., 2012. Meeting the demand for crop production: the challenge of yield decline in crops grown in short rotations. *Biological Reviews of the Cambridge Philosophical Society*, 87(1), 52–71. <http://doi.org/10.1111/j.1469-185X.2011.00184.x>
- Berendsen, R. L., Pieterse, C. M. J., & Bakker, P. A. H. M., 2012. The rhizosphere microbiome and plant health. *Trends in Plant Science*, 17(8), 478–486. <http://doi.org/10.1016/j.tplants.2012.04.001>
- Bucaille, F. 2020. *Revitaliser les sols. Diagnostic, fertilisation, protection*. Dunod, 240p
- Burgess, P.J., Harris, J., Graves, AR., Deeks, LK., 2019. *Regenerative Agriculture: Identifying the Impact; Enabling the Potential*. Report for SYSTEMIQ. 17 May 2019. Bedfordshire, UK: Cranfield University
- Campbell, B M., Beare, D J., Bennett E M, et al., 2017. Agriculture production as a major driver of the Earth system exceeding planetary boundaries. *Ecology and Society*; 22(4).
- Charyulu, P. B. N., Rao, V. R., 1980. Influence of various soil factors on nitrogen fixation by *Azospirillum* spp. *Soil Biology and Biochemistry*, 12(4), 343–346.
- Doran, J. W., Zeiss, M. R., 2000. Soil health and sustainability: managing the biotic component of soil quality. *Applied soil ecology*, 15(1), 3–11.
- Duru, M, 2023. L'ACS permet-elle de fournir une alimentation de meilleure qualité ? Ouvrage Quae sur l'agriculture de conservation (à paraître)

- Duru, M., Therond, O., Martin, G., Martin-Clouaire, R., Magne, M. A., Justes, E., ... & Sarthou, J. P., 2015. How to implement biodiversity-based agriculture to enhance ecosystem services: a review. *Agronomy for sustainable development*, 35, 1259-1281.
- Duru M., Sarthou, J. P., Therond, O., 2022. L'agriculture régénératrice : summum de l'agroécologie ou greenwashing ? *Cahiers Agricultures*, 31, 10p.
- Evans, D. L., Quinton, J. N., Davies, J. A., Zhao, J., & Govers, G. 2020. Soil lifespans and how they can be extended by land use and management change. *Environmental Research Letters*, 15(9), 0940b2.
- Feeny, D., Berkes, F., McCay, B. J., & Acheson, J. M., 1990. The tragedy of the commons: twenty-two years later. *Human ecology*, 18, 1-19.
- Fustec, J., Lesuffleur, F., Mahieu, S., Cliquet, J.-B., 2010. Nitrogen rhizodeposition of legumes. A review. *Agron. Sustain. Dev.*, 30, 57-66.
- Giller, K. E., Hijbeek, R., Andersson, J. A., & Sumberg, J., 2021. Regenerative Agriculture: An agronomic perspective. *Outlook on Agriculture*. <http://doi.org/10.1177/0030727021998063>
- Gordon, E., Davila, F., Riedy, C., 2023. Regenerative agriculture: A potentially transformative storyline shared by nine discourses. *Sustainability Science*, 1-17.
- de Graaff, M. A., Hornslein, N., Throop, H. L., Kardol, P., van Diepen, L. T., 2019. Effects of agricultural intensification on soil biodiversity and implications for ecosystem functioning: a meta-analysis. *Advances in Agronomy*, 155, 1-44.
- Gregory, S. J., Anderson, C. W. N., Camps-Arbestain, M., Biggs, P. J., & Ganley, A. R. D. O" Sullivan JM, McManus MT. 2015. Biochar in cocontaminated soil manipulates arsenic solubility and microbiological community structure, and promotes organochlorine degradation. *PLoS one*, 10(4), e0125393.
- Guyonnet, JP., Guillemet, M., Dubost, A., et al., 2018. Plant nutrient resource use strategies shape active rhizosphere microbiota through root exudation. *Front Plant Sci* 871:1-13. <https://doi.org/10.3389/fpls.2018.01662>
- Hermans, S. M., Lear, G., Case, B. S., & Buckley, H. L., 2023. The soil microbiome: An essential, but neglected, component of regenerative agroecosystems. *iScience*, 106028.
- Husson, O., 2013. Redox potential (Eh) and pH as drivers of soil/plant/microorganism systems: a transdisciplinary overview pointing to integrative opportunities for agronomy. *Plant and Soil*, 362 (1-2): 389-417. <https://doi.org/10.1007/s11104-012-1429-7>
- Husson, O., Husson, B., Brunet, A., Babre, D., Alary, K., Sarthou, J.-P., Charpentier, H., Durand, M., Benada, J., Henry, M., 2016. Practical improvements in soil redox potential (Eh) measurement for characterisation of soil properties. Application for comparison of conventional and conservation agriculture cropping systems. *Analytica Chimica Acta* 906, 98-109. <https://doi.org/10.1016/j.aca.2015.11.052>
- Husson, O., Sarthou, J.-P., Bousset, L., Ratnadass, A., Schmidt, H.-P., Kempf, J., Husson, B., Tingry, S., Aubertot, J.-N., Deguine, J.-P., Goebel, F.-R., Lamichhane, J.R., 2021. Soil and plant health in relation to dynamic sustainment of Eh and pH homeostasis: A review. *Plant Soil* 466, 391-447. <https://doi.org/10.1007/s11104-021-05047-z>
- Husson, O., 2023. *How pH and Eh Influence Soil Nutrient Dynamics with Microbial Mediation*. In: Biological approaches to regenerative soil systems. Uphoff, N. and Thies, J. (Eds). CRC Press, New York. Chapter 21. ISBN: 9780367554712
- Jacoby, R., Peukert, M., Succurro, A., Koprivova, A., Kopriva, S., 2017. The Role of Soil Microorganisms in Plant Mineral Nutrition—Current Knowledge and Future Directions. *Frontiers in Plant Science*, 8(September), 1-19. <http://doi.org/10.3389/fpls.2017.01617>
- Johannes, A., Matter, A., Schulin, R., Weisskopf, P., Baveye, P. C., Boivin, P., 2017. Optimal organic carbon values for soil structure quality of arable soils. Does clay content matter? *Geoderma*, 302(April), 14-21. <http://doi.org/10.1016/j.geoderma.2017.04.021>
- Khanguara, R., Ferris, D., Wagg, C., Bowyer, J., 2023. Regenerative Agriculture — A Literature Review on the Practices and Mechanisms Used to Improve Soil Health. *Sustainability*, 1-43.
- Kirkby, C. A., Richardson, A. E., Wade, L. J., Batten, G. D., Blanchard, C., Kirkegaard, J. A., 2013. Carbon-nutrient stoichiometry to increase soil carbon sequestration. *Soil Biology and Biochemistry*, 60, 77-86. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2013.01.011>
- Kirkby, C. A., Richardson, A. E., Wade, L. J., Passioura, J. B., Batten, G. D., Blanchard, C., Kirkegaard, J. A., 2014. Nutrient availability limits carbon sequestration in arable soils. *Soil Biology and Biochemistry*, 68, 402-409. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2013.09.032>
- Kirschbaum, M. U. F., Moinet, G. Y. K., Hedley, C. B., Beare, M. H., McNally, S. R., 2020. A conceptual model of carbon stabilisation based on patterns observed in different soils. *Soil Biology and Biochemistry*, 107683. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2019.107683>
- Lassaletta, L., Billen, G., Garnier, J., Bouwman, L., Velazquez, E., Mueller, N. D., & Gerber, J. S., 2016. Nitrogen use in the global food system: past trends and future trajectories of agronomic performance, pollution, trade, and dietary demand. *Environmental Research Letters*, 11(9), 095007.
- Lebeis, S. L., Paredes, S. H., Lundberg, D. S., 2015. Break eld N, Gehring J, McDonald M, Malfatti S, Del Rio TG, Jones CD, Tringe SG: Salicylic acid modulates colonization of the root microbiome by specific bacterial taxa. *Science*, 349, 860-864.
- Liang, C., 2020. Soil microbial carbon pump: Mechanism and appraisal. *Soil Ecology Letters*, 2, 241-254.
- Lomheim, L., Laquitaine, L., Raminaising, S., Flick, R., Starostine, A., Jean-Marius, C., ... & Gaspard, S., 2020. Evidence for extensive anaerobic dechlorination and transformation of the pesticide chlordecone (C10Cl10O) by indigenous microbes in microcosms from Guadeloupe soil. *PLoS One*, 15(4), e0231219.
- Mandon, K., Nazaret, F., Farajzadeh, D., Alloing, G., Frendo, P., 2021. Redox regulation in diazotrophic bacteria in interaction with plants. *Antioxidants*, 10(6), 880.
- Masotti, F., Garavaglia, B. S., Gottig, N., & Ottado, J., 2023. Bioremediation of the herbicide glyphosate in polluted soils by plant-

associated microbes. *Current Opinion in Microbiology*, 73, 102290.

Montgomery, D. R., Bikiél, A., Archuleta, R., Brown, P., Jordan, J., 2022. Soil health and nutrient density: preliminary comparison of regenerative and conventional farming. *PeerJ*, 1–20. <http://doi.org/10.7717/peerj.12848>

Murphy, B., 2020. Soil carbon sequestration as an elusive climate mitigation tool. *No-till Farming Systems for Sustainable Agriculture: Challenges and Opportunities*, 337-353.

Nicolardot, B., Recous, S., Mary, B., 2001. Simulation of C and N mineralisation during crop residue decomposition: a simple dynamic model based on the C: N ratio of the residues. *Plant and soil*, 228(1), 83-103.

Nielsen, U. N., Wall, D. H., Six, J., 2015. Soil Biodiversity and the Environment. *Annual Review of Environment and Resources*, 40(1), 63–90. <http://doi.org/10.1146/annurev-environ-102014-021257>

Petit, S., Deytieux, V., Cordeau, S., 2021. Landscape-scale approaches for enhancing biological pest control in agricultural systems. *Environmental Monitoring and Assessment*, 193(Suppl 1), 75.

Pieterse, C. M., Zamioudis, C., Berendsen, R. L., Weller, D. M., Van Wees, S. C., Bakker, P. A., 2014. Induced systemic resistance by beneficial microbes. *Annual review of phytopathology*, 52, 347-375.

Poeplau, C., Don, A., 2023. A Simple Soil Organic Carbon Level Metric beyond the Organic Carbon-to-Clay Ratio, *Soil Use and Management*, 2023, 1057–67 <<http://dx.doi.org/10.1111/sum.12921>>

Powles, S. B., Yu Q., 2010. Evolution in action: plants resistant to herbicides. *Annual review of plant biology*, 61, 317-347.

Prashar, P., Shah, S., 2016. Impact of fertilizers and pesticides on soil microflora in agriculture. *Sustainable Agriculture Reviews: Volume 19*, 331-361.

Rabotnova, IL., Schwartz, W., 1962. *The importance of physical-chemical factors (pH and rHz) for the life activity of microorganisms*. VEB Gustav Fischer Verlag, Berlin

Rosinger, C., Keiblinger, K., Bieber, M., Bernardini, L. G., Huber, S., Mentler, A., ... Bodner, G., 2023. On-farm soil organic carbon sequestration potentials are dominated by site effects, not by management practices. *Geoderma*, 433(March), 116466. <http://doi.org/10.1016/j.geoderma.2023.116466>

Rowley, M. C., Grand S., Verrecchia É. P., 2018. Calcium-mediated stabilisation of soil organic carbon. *Biogeochemistry*, 137 (1-2), 27-49.

Rusch, A., Chaplin-Kramer, R., Gardiner, M. M. et al., 2016. Agricultural landscape simplification reduces natural pest control: A quantitative synthesis. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 221, 198-204.

Sirami, C., Gross, N., Baillod, A. B., Bertrand, C., Carrié, R., Hass, A., ... Fahrig, L., 2019. Increasing crop heterogeneity enhances multitrophic diversity across agricultural regions. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 116(33), 16442–16447. <http://doi.org/10.1073/pnas.1906419116>

Smith, P., Cotrufo, M. F., Rumpel, C., Paustian, K., Kuikman, P. J., Elliott, J. A., ... Scholes, M. C., 2015. Biogeochemical cycles and biodiversity as key drivers of ecosystem services provided by soils. *SOIL Discussions*, 2(1), 537–586. <http://doi.org/10.5194/soild-2-537-2015>

Soong, J. L., Fuchslueger, L., Marañon-Jimenez, S., Torn, M. S., Janssens, I. A., Penuelas, J., & Richter, A., 2020. Microbial carbon limitation: The need for integrating microorganisms into our understanding of ecosystem carbon cycling. *Global Change Biology*, 26(4), 1953–1961. <http://doi.org/10.1111/gcb.14962>

Tamburini, G., Bommarco, R., Wanger, T. C., Kremen, C., van der Heijden, M. G. A., Liebman, M., Hallin, S., 2019. Agricultural diversification promotes biodiversity and multiple ecosystem services without compromising yield. *Submitted to Science Advances*, 10/28/2019.

Therond, O., Duru, M., 2019. Agriculture et biodiversité : les services écosystémiques, une voie de réconciliation ? *Innovations agronomiques*, 75, 29-47.

Tittonell, P., Mujtar, V. El, Felix, G., Kebede, Y., Laborda, L., & Soto, R. L., 2022. Regenerative agriculture — agroecology without politics? *Sustainable Food Systems*, 6, 844261.

Tourdonnet, S (de), 2017. La place des cultures intermédiaires multi-services dans un processus d'innovation : l'agriculture de conservation. *Innovations Agronomiques*, 62, pp.143-148.

Wezel, A., Bellon, S., Doré, T., Francis, C., Vallod, D., David, C., 2009. Agroecology as a science, a movement and a practice. A review. *Agronomy for sustainable development*, 29, 503-515.

Wilbois, K. P., Schmidt, J. E., 2019. Reframing the debate surrounding the yield gap between organic and conventional farming. *Agronomy*, 9(2), 82.

Wood, S., Sebastian, K. and Scherr, S.J., 2000. *Pilot Analysis of Global Ecosystems (PAGE): Soil Resource Condition*. IFPRI and World Resources Institute, Washington, DC, pp. 45–54.



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 USLE⁵⁴ (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 PLAGE⁵⁵, 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 RMT⁵⁶ Erytage⁵⁷ (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 projets⁵⁸. 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.

⁵⁴ USLE : Universal Soil Loss Equation

⁵⁵ PLAGE : Plate-forme d'évaluation AGri-Environnementale

⁵⁶ RMT : réseau mixte technologique ; GIS : groupement d'intérêt scientifique

⁵⁷ ERYTAGE : Evaluation de la durabilité des Territoires et sYstèmes AGricolEs

⁵⁸ . 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 (Rosnoblet 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 disposition⁵⁸ (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: PDF file:



Origin: Multithematic:

Year of publication: Comment: English or English and German"/>

Identifiers (DOI, ISBN): Webpage:

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

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

 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/Quantit	Unit	Indicator type	Calculation or variables description
M001_022	Démarche de qualité	EC003_02	No details	Score	causal	Liee au territoire (ADC, IGP...), liee au process (label rouge, norme ISO 14000).
M001_027	Valorisation par filières courtes	EC007_04	Quantitative	Score	causal	Vente à proximité, Valeur des ventes directes par rapport au chiffre d'affaire
M001_030	Contribution à l'emploi	EC012_01	Quantitative	Score	causal	Surface / UTH, création d'emploi sur l'exploitation dans les 5 dernières années
M001_045	Efficience du processus productif	EC013_05	Quantitative	Score	causal	(Produit - Intrants) / Produit
M001_041	Taux de spécialisation économique	EC015_01	Quantitative	Score	causal	Part du chiffre d'affaire de la plus importante activité, part du chiffre d'affaire
M001_040	Viabilité économique	EC015_02	Quantitative	Score	causal	VE = (EBE - BF) / UTH non-salarié (BF = besoin de financement)
M001_028	Autonomie et valorisation des ressources locales	EC016_01	Quantitative	Score	causal	Autonomie vis-à-vis des aliments, des engrais organiques, des animaux (hors r
M001_042	Autonomie financière	EC016_02	Quantitative	Score	causal	Dépendance financière (DF) : DF = (Somme Amortissements + frais financiers CT) / EB
M001_043	Sensibilité aux aides du premier pilier de la PAC (Politique A	EC016_02	Quantitative	Score	causal	Σ aides / EBE
M001_032	Pérennité probable	EC017_04	Qualitative	Score	causal	Probabilité de l'existence de l'exploitation dans 10 ans
M001_044	Transmissibilité du capital	EC021_01	Quantitative	Score	causal	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), l
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](#)

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



 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 FAO⁵⁹ 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

⁵⁹ 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.

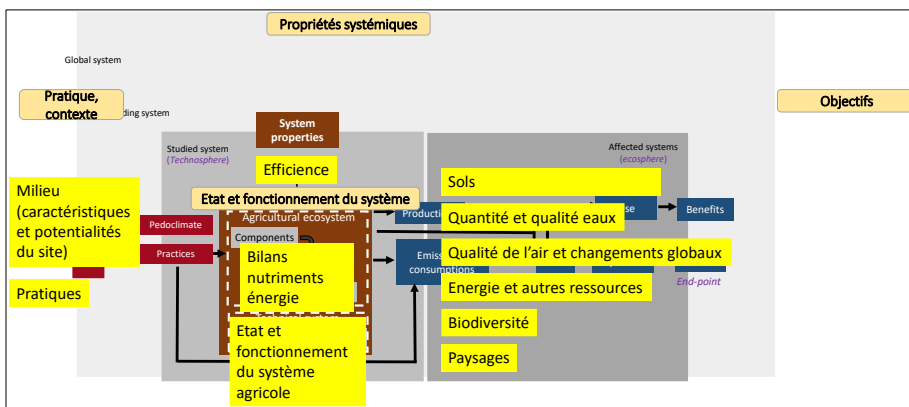


Figure 2 : Positionnement des critères de classification des indicateurs environnementaux sur le cadre conceptuel de Bockstaller et al. (2023, dans ce numéro). Les critères « milieu » et « pratiques » n’ont pas été détaillés par souci de simplification.

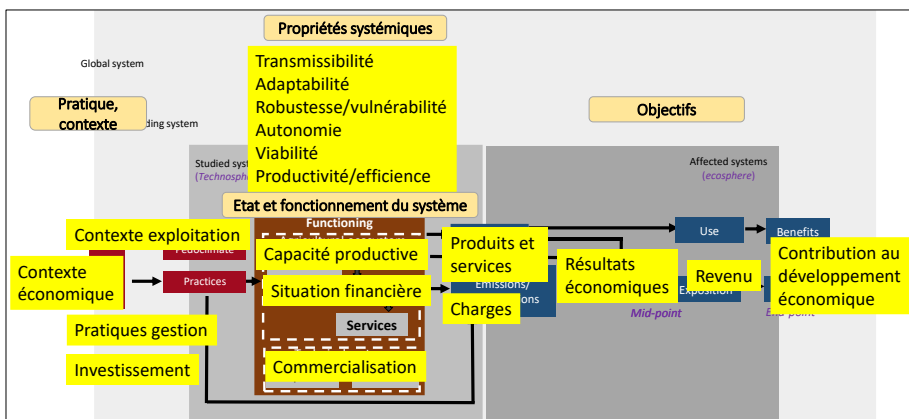


Figure 3 : Positionnement des critères de classification des indicateurs économiques sur le cadre conceptuel de Bockstaller et al. (2023, dans ce numéro).

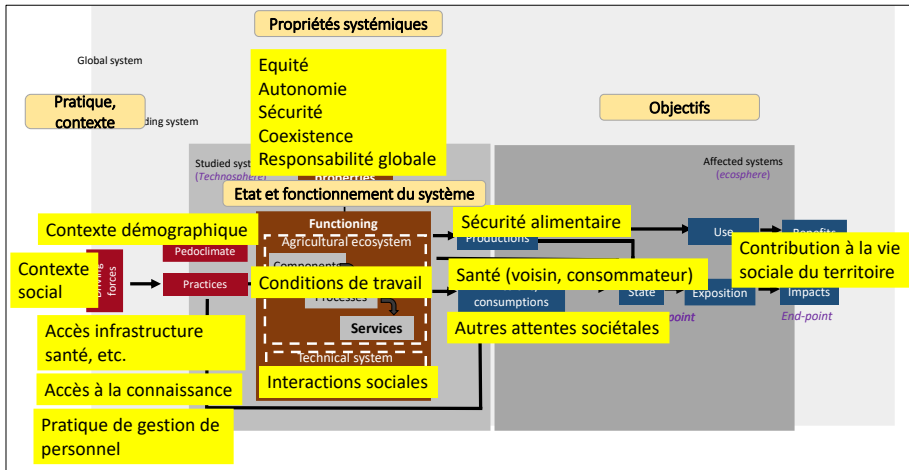


Figure 4 : Positionnement des critères de classification des indicateurs sociaux sur le cadre conceptuel de Bockstaller et al. (2023, dans ce numéro).

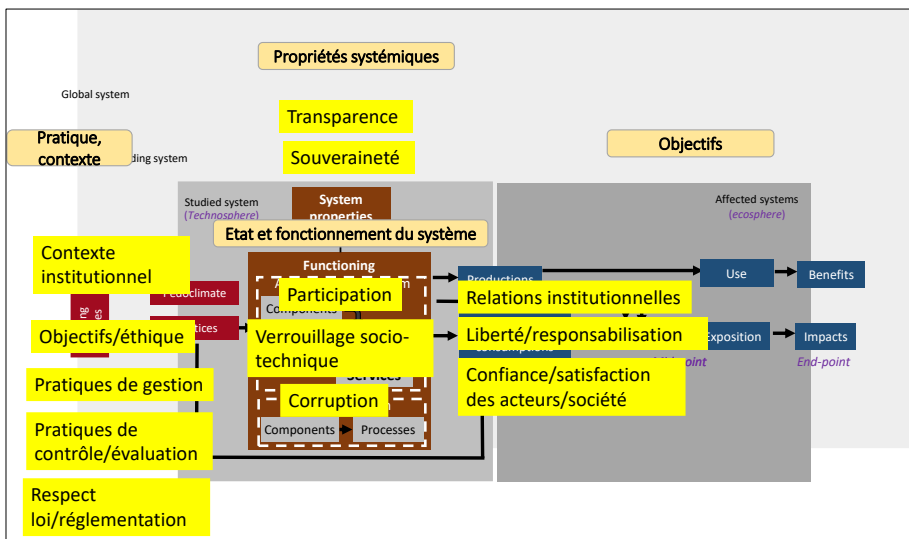


Figure 5 : Positionnement des critères de classification des indicateurs de gouvernance sur le cadre conceptuel de Bockstaller et al. (2023, dans ce numéro).

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/efficience 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	Efficacité économique	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	Évaluation 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	Équité	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

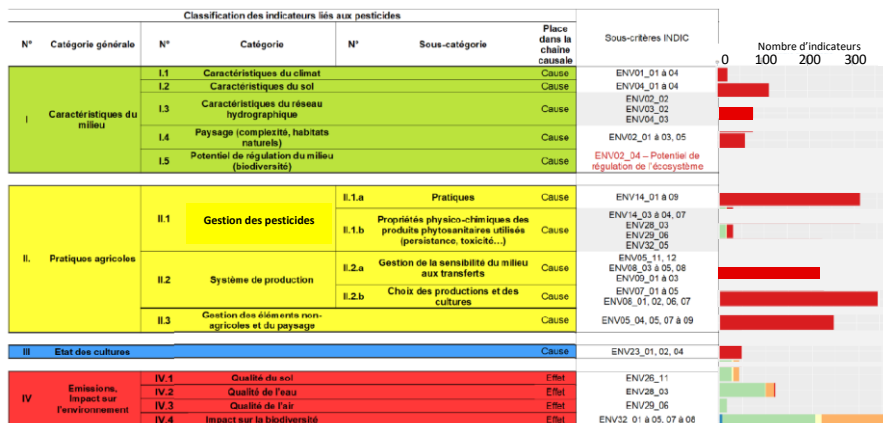


Figure 6 : Typologie et nombre d'indicateurs par catégorie pour la thématique des pesticides. Les barres rouges, saumon, jaunes, vertes et bleues représentent respectivement des indicateurs de cause, les indicateurs mesurés d'effet, les types indéterminés, les indicateurs d'effet prédictifs et les combinés 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 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 05
				II.1.d	Gestion des résidus et du sol	Cause	ENV03_07 à 09, ENV09_01, 02					ENV06_07 à 09, ENV09_01 à 03, 05
		II.2	Pratiques d'Élevage	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	ENV18_03		ENV18_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		ENV29_01				
		V.2	Séquestration de carbone			Effet					ENV29_02	

b)

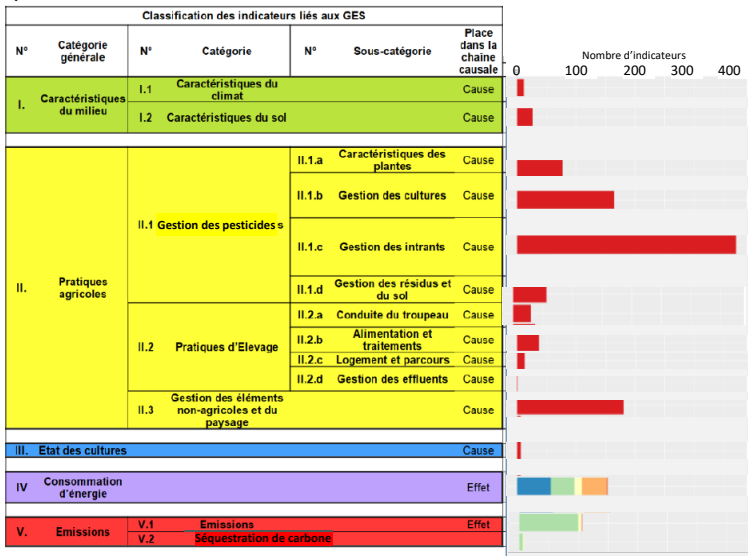


Figure 7 : Typologie des indicateurs pour la thématique gaz à effet de serre (a) et nombre d'indicateurs par catégorie (b). Les barres rouges, saumon, jaunes, vertes et bleues représentent respectivement des indicateurs de cause, les indicateurs mesurés d'effet, les types indéterminés, les indicateurs 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
					Vulnérabilité, 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 résidus de récolte					ENV08_08
	Evaluation générale ou autre					ENV08_09
	Gestion et travail du sol					ENV09
			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, efficacité (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	Efficience	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, 40, 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/ocf/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/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 pharmaceutiques 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-Ridausa, 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*. Institut de l'Élevage (IDELE), Paris (France).
- Paracchini, M. L., Bulgheroni, C., Borreani, G., Tabacco, E., Banterle, A., Bertoni, D., Rossi, G., Parolo, G., Origgì, 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., Weinzapfen, E., & Bockstaller, C. (2006). Analysis of 15 years of agriculture sustainability evaluation methods. In M. Fotyra & 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., Miguët, P., Vuillot, C., Alignier, A., Girard, J., Batáry, P., Clough, Y., Violle, C., Giralt, D., Bota, G., Badenhassler, 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 territoires. *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., & Redlingshöfer, 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>



Indicateurs fonctionnels et mécanistes pour évaluer le phosphore phytodisponible du sol

Christian Morel*

* INRAE Bordeaux, ISPA, 33140 Villenave d'Ornon, France
Contact auteur : christian.morel@inrae.fr

Résumé

Le raisonnement de la fertilisation phosphatée des grandes cultures repose pour beaucoup sur la quantité de phosphore (P) du sol disponible pour les plantes (P phytodisponible), évaluée en routine avec des extractions chimiques. Mais leur manque de pertinence et de fiabilité questionne sur leur bien-fondé scientifique. Leurs limites conceptuelles, qui expliquent ces insuffisances, sont de ne pas considérer le fonctionnement du système sol-solution-racines lors de la nutrition phosphatée des plantes.

Cet article vise à présenter en quoi des recherches ont fait évoluer la compréhension de la nutrition phosphatée des plantes pour enrichir le raisonnement de la fertilisation phosphatée dans le contexte de la transition agroécologique. Des indicateurs fonctionnels et mécanistes du P phytodisponible, i.e., ions phosphates dissous et diffusibles à l'interface solide-solution déterminés dans des suspensions sol-eau, ont été progressivement développés et testés pour des sols cultivés en grandes cultures. Quelques résultats importants sont présentés dans ce document. Des travaux supplémentaires sont nécessaires pour généraliser la valeur agronomique de ces indicateurs et leur transfert vers les laboratoires d'analyse de sol par la construction de fonctions de pédotransfert.

Mots-clés : phosphore phytodisponible, indicateurs, sol, agroécosystème, gestion, fertilisation, grandes cultures, France métropolitaine

Abstract

Managing phosphorus fertility in cropped soils under annual crops is a major concern for agronomic and environmental purposes. It relies heavily on assessments of the amount of plant-available soil phosphorus (P), which are routinely carried out by soil analysis laboratories using chemical extractions. Their lack of relevance and reliability, due to conceptual limitations, questions their scientific validity. Their main shortcoming is that they do not consider the functioning of the soil-solution-root system during plant phosphate nutrition.

This article aims to present how the research has changed our understanding of phosphate nutrition in plants. To support the agroecological transition, functional and mechanistic indicators of plant-available soil P have been developed. These indicators, i.e., dissolved and diffusive phosphate ions at the solid-solution interface of soils, which are determined in soil-water suspensions, significantly improve the reliability of multisite diagnosis of maize response by taking into account the kinetics of phosphate ion replenishment in the solution. The physicochemical determinism of these indicators in non-carbonate soils is largely controlled by clay and fine silt content. Further research is needed before these indicators can be transferred to soil analysis laboratories.

Keywords: plant-available soil phosphorus, indicators, agroecosystems, management, fertilization, annual crops, France

Introduction

Le phosphore (P) du sol est un des éléments nutritifs majeurs du sol, indispensables à la croissance et au développement des cultures. C'est pourquoi la recherche agronomique s'est intéressée de longue date à la question de l'évaluation de la quantité de P du sol, disponible pour les plantes (désignée dans ce texte par P phytodisponible), définie comme la fraction du P total du sol susceptible de participer à la nutrition des plantes après avoir été prélevée par les racines et ses auxiliaires (champignons mycorhiziens du sol). Cette problématique est au centre d'enjeux importants, de nature agronomique (production durable, substitution des engrais de synthèse par des produits résiduels organiques (Fuchs *et al.*, 2015), environnementale (qualité des eaux de surface (Dorioz *et al.*, 2006 ; Pinay *et al.*, 2018), de risque de pénurie des réserves fossiles de roches phosphatées (Cordell et White, 2011 ; Obersteiner *et al.*, 2013), et de perte de biodiversité des agroécosystèmes (Ceulemans *et al.*, 2014).

Cet article propose une synthèse des connaissances sur les indicateurs du P phytodisponible. Il rappelle brièvement les insuffisances des méthodes d'extraction chimique du P du sol, le fonctionnement des racines pendant l'absorption de P du sol et comment, sur ces bases fonctionnelle et mécaniste, des indicateurs ont été mis au point à partir de la prise en compte des processus importants. Cet article présente ensuite un exemple de l'intérêt scientifique de ces nouveaux indicateurs, puisque ceux-ci améliorent notablement le diagnostic multisite de la réponse d'une culture donnée. Pour conclure, une première étude est présentée sur le déterminisme physico-chimique de ces nouveaux indicateurs en utilisant les propriétés du sol déterminées en routine.

Insuffisances du P extrait par des réactifs chimiques

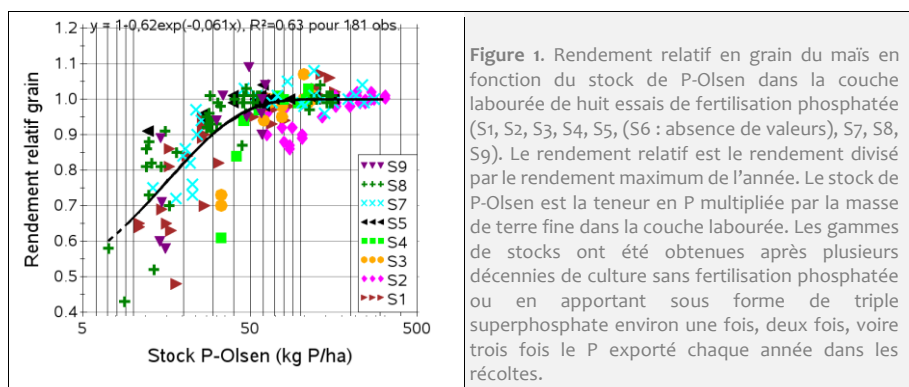
Les méthodes, utilisées en routine dans les laboratoires d'analyse de sol, pour évaluer le P phytodisponible et élaborer un conseil de fertilisation phosphatée, consistent à extraire le P du sol avec des réactifs chimiques. Il en existe de très nombreuses (Jordan-Meille *et al.*, 2012 ; Ziadi *et al.*, 2013 ; Steinfurth *et al.*, 2021). Celles couramment utilisées en France pour des échantillons de terre, issus de parcelles cultivées en grandes cultures, sont les extractions Dyer (solution d'acide citrique à 2 % avec un pH d'extraction de 2,0), Joret-Hébert (solution d'oxalate d'ammonium 0,2 N avec un pH d'extraction d'environ 7,0) et Olsen (solution de bicarbonate de sodium 0,5 M tamponnée à un pH de 8,5) (Boniface et Trocmé, 1988).

Des courbes diagnostiques du comportement des cultures ont été élaborées pour ces méthodes en exploitant les séries chronologiques de données produites par des essais de longue durée sur la fertilisation phosphatée, implantés dans des situations (sols × cultures × climats) variées et représentatives de celles rencontrées en France métropolitaine. En général, des doses croissantes (incluant un traitement sans apport) de superphosphate y sont apportées chaque année pendant plusieurs décennies. Pour chacun d'eux, le rendement annuel et le prélèvement de P sont étudiés et analysés en fonction de l'évolution de la teneur de P chimiquement extrait avec les années de culture et les régimes de fertilisation (Boniface et Trocmé, 1988 ; Steinfurth *et al.*, 2021). Malheureusement, en regroupant les résultats de ces essais, la courbe de réponse est généralement peu explicative. Une part de la variance résiduelle inexplicée est prise en compte par la notion d'exigence⁶⁰ en P des cultures. Mais, même en considérant une seule culture, la dispersion des points expérimentaux reste très élevée puisque plus de 50% de la variabilité expérimentale n'est pas prise en compte (Morel *et al.*, 1992 ; Tang *et al.*, 2009). Un exemple typique est présenté dans la Fig. 1 pour huit essais P de longue durée. Cette variabilité expérimentale résiduelle importante empêche de définir un seuil précis de raisonnement ayant une portée générale. Pour la Figure 1, après conversion des stocks en teneurs, la teneur en P-Olsen dans la

⁶⁰ L'exigence d'une culture vis-à-vis du phosphore désigne la plus ou moins grande perte de rendement lorsque l'offre du sol en P est de plus en plus faible.

couche labourée⁶¹ correspondant à 95% du rendement maximum varie entre 6,0 (S8) et 36,1 (S2) mg P kg⁻¹ selon les essais. Pour surmonter cette difficulté et éviter tout risque de perte de rendement, des seuils excédentaires ont été utilisés afin de sécuriser la production (Pellerin *et al.*, 2009).

L'absence ou le peu de corrélation entre le P prélevé par une culture de blé et le P extrait a également été clairement montré par Zehetner *et al.* (2018) dans un ensemble de 50 sols agricoles d'Europe centrale. Plus l'extraction est agressive, plus le P extrait est important mais moins il est corrélé au prélèvement. Par contre, après mise en suspension dans de l'eau ou une solution saline diluée, la quantité extraite est très significativement corrélée à la nutrition phosphatée bien qu'elle soit beaucoup plus petite.



L'explication de cette insuffisance est qu'une extraction chimique mobilise des formes non phytodisponibles de P du sol dans des proportions importantes et variables suivant le réactif chimique, le type de sol et l'historique de fertilisation (Fardeau *et al.*, 1988).

Les recherches des dernières décennies ont donc apporté leur lot de connaissances pour faire évoluer régulièrement le raisonnement de la fertilisation phosphatée : abandon des notions de fumure de redressement et d'effet « vieille grasse » ; notion d'exigence des cultures vis-à-vis du P phytodisponible (Boniface et Trocmé 1988) ; utilisation de la méthode Olsen (Fardeau *et al.* 1988) plutôt que les méthodes Dyer ou Joret-Hébert ; construction de référentiels régionaux par types de sol ; mise à jour des teneurs de P dans les organes récoltés. Pour plus de détails, le lecteur se reportera aux travaux du groupe PKMg du Comifer (<https://comifer.asso.fr/phosphore-potassium-magnesium/>). Dans le même temps, l'extraction chimique du P du sol a révélé au fil des recherches ses limites conceptuelles, son manque de pertinence et de fiabilité, faute de ne pas intégrer le fonctionnement du système sol-solution-racines lors de la nutrition des plantes. Un renouvellement des bases scientifiques du raisonnement était dès lors nécessaire pour espérer gérer durablement la fertilité phosphatée des sols (Pellerin *et al.*, 2009 ; 2014).

Le P est présent dans les sols sous une très grande diversité de formes en quantité variable

La teneur totale de P dans la couche labourée de sols cultivés sous grandes cultures est généralement comprise entre 50 et 1000 mg kg⁻¹, et peut atteindre des valeurs très supérieures dans des situations extrêmes, selon les types de sols, notamment selon leur âge, leur degré d'altération et leur historique de fertilisation. Il existe de nombreuses formes minérales et

⁶¹ Le stock de P dans la couche labourée de sol est la teneur en P multipliée par la masse de terre fine dans la couche labourée de sol.

organiques qui contiennent du P que ce soit dans la solution ou dans la phase solide des sols (Cade-Menun, 2017).

La solution contient des espèces ioniques, d'autres formes minérales et des composés organiques (Chapman *et al.*, 1997). Compte tenu de la gamme de pH des sols cultivés, généralement comprise entre 5,0 et 8,2, sont présents dans la solution de sol l'ion dihydrogénophosphate (H_2PO_4^-), majoritaire pour des pH acides, et l'ion hydrogénophosphate (HPO_4^{2-}), majoritaire pour des pH alcalins. L'acide phosphorique (H_3PO_4) et l'ion orthophosphate (PO_4^{3-}) ne sont pas présents dans ces conditions de pH. D'autres composés, i.e. du P associé à des colloïdes, des polyphosphates, du P organique dissous, ont également été identifiés en solution mais en moindre quantité, en particulier après mise en suspension (Chapman *et al.*, 1997). Après mise en suspension (1g sol/10 cm^3 eau) et filtration, la concentration (C_p) des ions phosphate dissous dans la solution est généralement comprise entre 0,001 mg P dm^{-3} dans des sols tropicaux acides, très réactifs vis-à-vis des ions phosphates et jusqu'à des valeurs supérieures à 1 mg P dm^{-3} dans des sols fertilisés de longue date. En considérant une valeur moyenne de 0,2 mg P dm^{-3} , la quantité d'ions phosphates dissous ne représente donc qu'une toute petite part du P total du sol.

Dans la couche labourée de sols sous grandes cultures, de l'ordre de 70% du P total est sous forme inorganique (Morel, 2002), cette proportion variant avec le type de sol et, bien sûr, l'historique de fertilisation. Le restant est sous forme organique (le groupement phosphate est lié au carbone par une liaison ester, voire deux liaisons ester), majoritairement des phosphates monoesters (phytate, phospholipides...), dans une moindre proportion des phosphates diesters (ADN, ARN...) et quelques pourcents de phosphonates (Raguet *et al.* 2023).

Le P inorganique associé à la phase solide du sol peut être sous forme de minéraux phosphatés plus ou moins cristallisés dans lesquels le groupement phosphate est associé par des liaisons covalentes à du fer (Fe), de l'aluminium (Al), du calcium (Ca) ou du manganèse. Plusieurs centaines ont été identifiés (Nriagu et Moore, 1984). Les différents phosphates de Ca ont des solubilités dans l'eau qui varient de plusieurs ordres de grandeur entre les différentes minéraux (Dorozhkin, 2009). Par ailleurs, les ions phosphates dissous peuvent réagir avec les oxyhydroxydes de Fe (goethite et ferrihydrite) et d'Al (gibbsite), les minéraux argileux (par exemple montmorillonite, kaolinite...), les carbonates de Ca et la matière organique (Gérard, 2016 ; Sigg *et al.*, 2022). Le transfert sol-solution des ions phosphates dépend de leurs réactions et interactions avec les surfaces à charge variable de ces constituants. Plusieurs processus sont impliqués : l'échange d'anions, la complexation avec les oxyhydroxydes de Fe et d'Al, la précipitation/dissolution, la diffusion dans la phase solide. Ces réactions et interactions électrostatiques correspondent à des énergies de liaison plus ou moins fortes et conditionnent largement les vitesses de transfert à l'interface solide-solution. Les ions phosphates peuvent par exemple interagir avec les sites des surfaces et former des complexes de surface de sphère externe ou interne dont les constantes de formation dépendent de la charge électrique de surface, variable selon le pH et la concentration en Ca dissous. La formation de complexes de phosphates avec des ions Ca et Mg associés à des oxyhydroxydes de Fe et d'Al, à des argiles (porteuses de charge permanente négative et de charge variable), et à de la matière organique est également possible (Mendez et Hiemstra 2022).

Cycle biogéochimique du P dans des parcelles cultivées sous grandes cultures

Le cycle biogéochimique du P dans les agroécosystèmes désigne l'ensemble des stocks dans le sol, des flux entrants et sortants impliqués dans sa circulation entre les différentes composantes de l'agroécosystème et leurs modifications sous l'effet des réactions de transformation par des processus biologiques, physiques et chimiques (Ziadi *et al.*, 2013).

L'apport de P au sol se fait généralement sous forme d'engrais minéraux de synthèse (superphosphates, phosphates d'ammonium), obtenus après dissolution du minerai broyé de phosphates naturels, et/ou de matières fertilisantes organiques de nature diverse (fumiers, fientes, lisiers, composts urbains, boues de stations d'épurations urbaines...). Le P apporté peut varier entre 0 et parfois plus de 100 $\text{kg ha}^{-1} \text{an}^{-1}$. Cependant, en raison notamment de la baisse de

L'application des engrais minéraux de synthèse depuis le début des années 1970, le P apporté en France est aujourd'hui en moyenne assez proche du P exporté hors des parcelles agricoles même s'il existe encore de fortes disparités inter-régionales avec des régions toujours excédentaires en matière de bilan de P (Senthilkumar *et al.*, 2012 ; Pellerin *et al.*, 2014). Les retombées atmosphériques et l'altération du P du sol sont généralement négligeables à l'échelle de l'année. Le flux majeur de P exporté est le P exporté dans les récoltes (auquel il faut éventuellement ajouter le P des résidus de récolte s'ils sont exportés). La production de 6-7 t ha⁻¹ de grains de céréales exporte environ 20 kg P ha⁻¹ (46 kg P₂O₅ ha⁻¹) et restitue au sol de l'ordre de 10 kg P ha⁻¹ (23 kg P₂O₅ ha⁻¹) dans les résidus de récolte. Les autres flux sortant possibles sont de bien moindre importance sauf conditions particulières. La migration de P est faible compte tenu des réactions des ions phosphates avec la phase solide du sol. L'apport de P affecte la concentration des ions phosphates dans la solution de la couche labourée mais pas ou peu au-delà. Ainsi, dans un sol très sableux recevant entre 0 et 70 kg P ha⁻¹an⁻¹ de triple superphosphate pendant 12 ans, la concentration des ions phosphates dissous de la couche labourée a nettement varié (entre 0,1 et 1,5 mg P dm⁻³) alors que la quantité de P dans les eaux drainées à un mètre est restée assez stable de l'ordre de 0,35 kg ha⁻¹ (Fourrie *et al.*, 2011). Les sorties de P des parcelles agricoles vers les eaux de surface sont majoritairement associées aux écoulements de surface pendant des périodes de pluie entraînant des processus d'érosion et des quantités potentiellement importantes de P associées aux particules de sol érodées. Les pertes de P par érosion peuvent être réduites en aménageant les berges des cours d'eau par exemple avec des zones tampons de végétation (Dorioz *et al.*, 2006) et en supprimant la fertilisation phosphatée dans les sols par trop enrichis.

Mécanismes d'absorption du P du sol dans la rhizosphère

L'objectif est d'identifier les mécanismes de mobilisation du P du sol au sein de la rhizosphère⁶² et de chiffrer leur contribution relative à la nutrition phosphatée des plantes afin d'en déduire des indicateurs pertinents et fiables pour évaluer le P phytodisponible (Morel 2002).

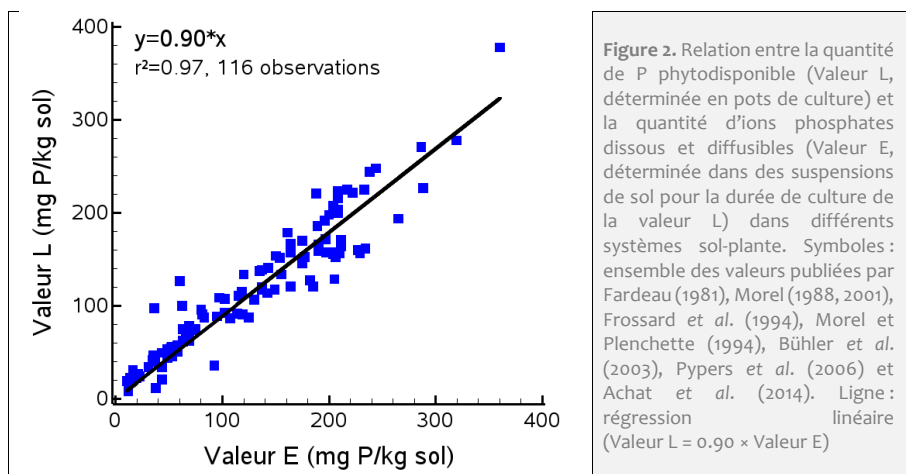
Les racines et les champignons mycorrhiziens associés prélèvent le P sous la forme d'ions phosphates directement dans la solution. La quantité de P que celle-ci représente à un instant t est cependant très loin de couvrir les besoins des cultures. Plus ou moins 99% des ions phosphates prélevés par une culture ont pour origine la phase solide du sol qui doit réalimenter la solution du sol en ions phosphates selon des processus et cinétiques variés. Comme les autres nutriments, ils peuvent être mobilisés de plusieurs façons. L'augmentation de la surface des racines est très efficace pour explorer le sol et aller chercher des éléments qui diffusent très peu, comme les ions phosphates (Barber, 1995). Le transport par convection (déplacement de l'eau) est également un moyen d'alimenter les racines mais qui ne joue qu'un rôle minime pour le P contrairement à l'azote, le Ca et le magnésium, qui sont présents à concentration élevée dans la solution.

L'activité des racines et des organismes associés est susceptible de modifier le P phytodisponible du sol rhizosphérique par rapport au sol non rhizosphérique en solubilisant ou insolubilisant des formes de P (Hinsinger *et al.*, 2009, 2011 ; Plassard *et al.*, 2017 ; Wang *et al.*, 2022). Compte tenu de leur diversité (voir ci-dessus), plusieurs mécanismes rhizosphériques pourraient contribuer à alimenter la solution de sol en ions phosphates. Il y a par exemple la diffusion sol-solution des ions phosphates ; les modifications de pH et des équilibres chimiques ; l'exsudation de carboxylates, petits anions organiques (malate, citrate...), qui augmenterait la présence d'ions phosphates dans la solution en s'échangeant avec des phosphates associés à des sites de réaction de la phase solide du sol, et/ou en complexant des cations ; l'exsudation de phosphatases, enzymes qui catalysent l'hydrolyse des molécules organiques phosphatées en libérant des ions phosphates.

Suite à l'absorption d'ions phosphates dissous, leur concentration est plus faible au voisinage des racines et plus élevée au niveau de la phase solide du sol (Barber, 1995). Ce gradient induit le transfert d'ions phosphates diffusibles depuis la phase solide vers la solution (Barbier *et al.*, 1971). La diffusion est un mécanisme universel qui désigne le déplacement associé à une différence de

⁶² volume de sol influencé par l'activité des racines et des micro-organismes associés (Wang *et al.*, 2022)

concentration dans un système afin de le rééquilibrer et l'homogénéiser. Ce processus existe même sans déplacement d'eau (convection). L'emploi de techniques isotopiques appliquées soit à des systèmes sol-solution-plante (pots de cultures), incluant des processus rhizosphériques, soit à des systèmes sol-solution (suspensions de terre), sans les processus rhizosphériques, montre que la diffusion à l'interface solide-solution du sol rend très largement compte du P phytodisponible du sol dans une large gamme de systèmes (sol-plante) et de niveau de fertilité phosphatée des sols (Valeur L comprise entre 9 et 358 mg P kg⁻¹) (Figure 2). Ces études ont été faites en utilisant le traçage isotopique des ions phosphates et application du principe de dilution isotopique soit au P prélevé par la culture (valeur L), soit aux ions phosphates dissous et diffusibles (valeur E).



La contribution des autres mécanismes rhizosphériques dans le réapprovisionnement de la solution de sol en ions phosphates a rarement été évaluée dans les conditions réelles ou proches de celles du champ cultivé. Un effort est donc nécessaire pour apporter des connaissances chiffrées. Cependant, dans les rares cas où cette évaluation a été faite, la contribution est apparue secondaire. Ainsi, l'exsudation de carboxylates ne semble jouer qu'un rôle mineur dans le prélèvement de P (Wang et al., 2016). L'ajout répété de phosphates naturels broyés, roche phosphatée contenant de l'apatite (phosphate de Ca très insoluble dans l'eau), dans un limon de pH neutre, tend à insolubiliser le P du sol (Morel, 2002) et non pas à le dissoudre sous l'effet d'activités rhizosphériques acidifiantes. Le récent travail de Raguet (2023), réalisé en exploitant les bases de données de plusieurs essais de longue durée, montre que la libération d'ions phosphates par minéralisation du P organique du sol dans la couche labourée de sols, cultivés en grande cultures, est faible en comparaison du processus de diffusion à l'interface solide-solution du sol. Par exemple, la minéralisation du stock de 368 kg P ha⁻¹ de P organique libère seulement 1.7 kg P ha⁻¹ an⁻¹ quel que soit le traitement de fertilisation (Raguet et al., 2023) alors que la diffusion sol-solution des ions phosphates varie de 540 à 2 200 kg P ha⁻¹ an⁻¹ avec les traitements.

Des interactions racines-microorganismes pourraient aussi être impliquées dans la nutrition phosphatée des plantes. Par exemple, l'association symbiotique entre racines et champignons mycorhiziens du sol contribue à la nutrition phosphatée pour la plupart des espèces de grandes cultures, sauf par exemple, chez les Brassicacées (colza, choux,...) et Chenopodiacées (betterave,...) qui ne forment pas cette symbiose. Si les formes absorbées de P du sol ne diffèrent pas significativement entre des plantes mycorhizées ou non (Morel et Plenchette, 1994 ; Bolan, 1991), l'exploration du P du sol par les hyphes au-delà de la zone d'épuisement de la racine (de l'ordre de quelques millimètres) explique l'amélioration du prélèvement (Plenchette, 1982). L'effet

est d'autant plus important que le sol est déficient en P et diminue avec la fertilisation phosphatée (Morel et Plenchette, 1994). D'autres pratiques (labour, pesticides, introduction de plantes non mycorhizogènes dans la rotation) abaissent également l'efficacité des mycorhizes (Plenchette et al., 2005).

D'autres interactions racines-microorganismes, comme les bactéries fixatrices d'azote, les bactéries PGPR (*Plant Growth-Promoting Rhizobacteria*), ou les PSM (*phosphate solubilizing microorganisms*), pourraient également contribuer à améliorer la nutrition phosphatée (Zhu et al., 2018). Les résultats, souvent obtenus dans des conditions expérimentales très éloignées de la réalité (sols très carencés non représentatifs du statut phosphaté des sols cultivés dans des régions tempérées, conditions très particulières de culture), sont difficiles à interpréter et à transposer aux conditions du champ. L'efficacité d'activateurs de la vie des sols, évaluée dans un réseau d'essais au champ, a montré des résultats peu probants et non rentables (Véricel et al., 2018).

Indicateurs fonctionnels et mécanistes pour évaluer le P phytodisponible du sol

Ces indicateurs sont la quantité d'ions phosphates dissous et celle diffusible à l'interface solide-solution (P_r , mg P kg⁻¹ sol) et leurs interrelations. Ils permettent d'imiter et de reproduire l'effet du processus de diffusion par le calcul de la quantité mobilisée pour tous gradients de concentration maintenus pendant des durées plus ou moins longues (Schneider et Morel, 2000 ; Morel et al., 2014 ; Morel et al., 2021). Ces effets sont calculés en utilisant une technique très performante, développée à partir des travaux de Georges Barbier (Barbier et al., 1971) puis de Jean-Claude Fardeau (Fardeau, 1981 ; 1993 ; Fardeau et al., 1985 ; 1991). Celle-ci consiste à associer dans des suspensions de sol⁶³ à l'état stationnaire, l'utilisation d'ions phosphates marqués avec du P radioactif, l'application du principe de dilution isotopique et la modélisation des valeurs expérimentales. Les suspensions de terre sont filtrées (<0.2 µm) pour recueillir quelques millilitres de solution de sol, utilisés pour déterminer les ions phosphates dissous et la radioactivité. Les valeurs expérimentales de P_r (mg P kg⁻¹ sol) et C_p (mg P dm⁻³ solution) sont calculées et utilisées pour paramétrer la fonction mathématique suivante qui donne la valeur de P_r pour toutes valeurs de C_p et du temps (Stroia et al., 2007 ; Morel et al., 2021) :

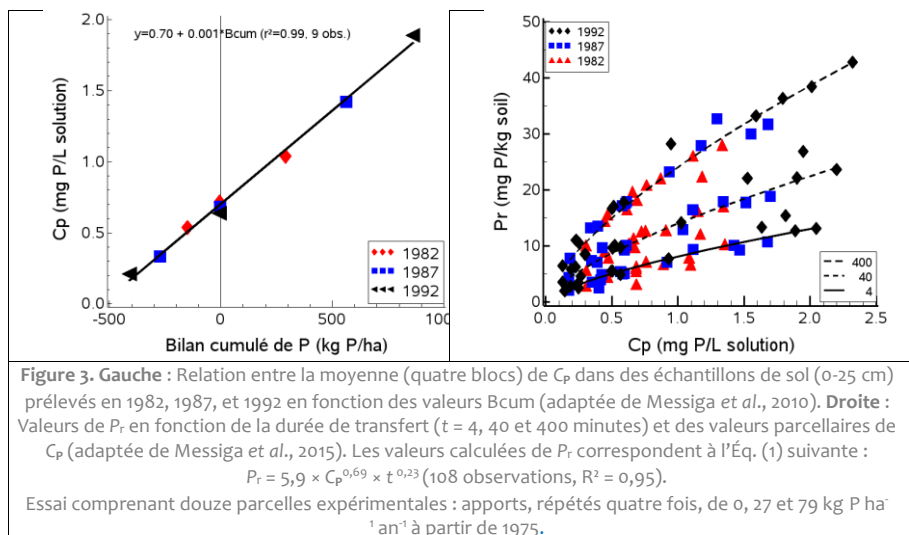
$$P_r = v \times C_p^w \times t^p \text{ avec } P_r < P_{r\text{-équilibre}} \quad [1]$$

dans laquelle t (minutes) désigne la durée de dilution isotopique. Le paramètre v est la valeur de P_r après une minute et lorsque C_p vaut 1 mg P dm⁻³. Le paramètre w (< 1) rend compte de la diminution exponentielle de l'affinité avec la saturation des surfaces en ions phosphates (répulsion électrostatique) et le paramètre p (< 0,5) rend compte de l'effet des réactions lentes probablement associées à la diffusion intraparticulaire dans la micro- et nano- porosité des agrégats et les constituants du sol. La valeur de P_r est bornée par la valeur d'équilibre ($P_{r\text{-équilibre}}$). L'équation (1) a également été proposée avec d'autres approches expérimentales (Chardon et Blaauw, 1998 ; Barrow, 2023).

À titre d'exemple, la Figure 3-gauche présente les valeurs de C_p en fonction du bilan cultural de P (Bcum), cumul du P apporté moins celui exporté dans les récoltes. Après 17 années de monoculture de maïs dans un sol de texture sablo-limono-argileuse recevant 0, 27 et 79 kg P ha⁻¹ an⁻¹ de triple superphosphate, la moyenne de C_p est comprise entre 0,21 et 1,89 mg P dm⁻³. C_p diminue avec des valeurs négatives de Bcum, ne varie pas quand Bcum est proche de zéro et augmente avec des valeurs positives de Bcum. Dans des sols non carbonatés, ces évolutions sont généralement décrites par une droite dont les coefficients varient entre essais (Morel et al., 2000 ; Stroia et al., 2007 ; Morel et al., 2014).

Pour le même site expérimental, les valeurs de P_r sont présentées pour trois durées de dilution isotopique et les valeurs de C_p pour chaque parcelle expérimentale (Figure 3-droite). La valeur de P_r augmente moins que proportionnellement avec les valeurs de t et C_p et l'Éq. 1 décrit très précisément l'ensemble des valeurs expérimentales.

⁶³ mélange de 1 g de sol pour 10 cm³ d'eau en présence de biocide pour éviter toute reprise d'activité microbiologique



La cinétique de l'Éq. (1) a été validée pour des durées de transfert de plusieurs mois (Fardeau et al., 1985). Les paramètres caractéristiques de ces cinétiques peuvent être déterminés sur des pas de temps beaucoup plus courts et être utilisés pour simuler par extrapolation les valeurs sur des pas de temps beaucoup plus longs (Fardeau, 1993). L'Éq. 1 a été obtenue dans des échantillons de sols de grandes cultures (Morel et al., 2014 ; Morel et al., 2021), de prairies (Stroia et al., 2007 ; Messiga et al., 2012) et de sédiments de fleuves (Némery et al., 2005). Les paramètres (v, w, p) dépendent des propriétés physico-chimiques du sol. Le paramètre v (0,6-162) varie largement. Les paramètres w (0,32-0,58) et p (0,15-0,45) varient également mais dans une moindre mesure (Mollier et al., 2019). L'intérêt de connaître les paramètres de l'Éq. (1) est de quantifier et de prévoir le rôle de la diffusion solide-solution des ions phosphates dans le réapprovisionnement de la solution ou leur rétention par la phase solide du sol pour tout gradient de concentration et toute durée de transfert y compris pour des temps longs. Ainsi, une application possible est de compartimenter l'offre du sol en P en considérant des périodes de plus en plus longues de transfert sol-solution des ions phosphates (par exemple, un jour, trois mois et un an (Fardeau, 1993)) pour calculer des vitesses de réapprovisionnement à différentes échelles de temps. D'autres grandeurs du comportement des ions phosphates à l'interface solide-solution du sol peuvent être calculées pour toutes valeurs de C_p et de t à partir de l'Éq. (1), comme par exemple, des courbes de sorption-désorption, le pouvoir tampon du sol vis-à-vis des ions P, le coefficient de distribution sol-solution...

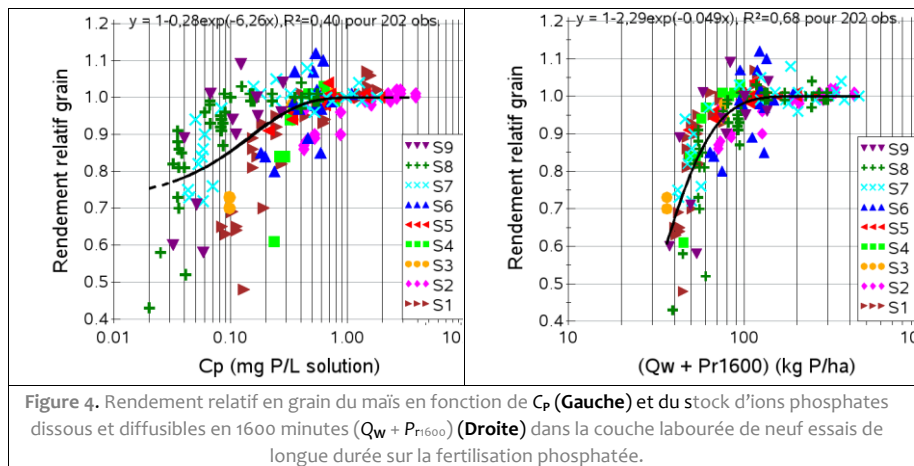
Un modèle a été construit afin d'intégrer les flux et processus majeurs impliqués dans le cycle du P. Ce modèle couple le bilan cultural de P avec le P phytodisponible et permet de simuler au pas de temps de l'année ses évolutions sur plusieurs décennies (Morel et al., 2017). Il est utile pour prévoir les évolutions du P phytodisponible en l'absence de tout apport de P ou pour des apports équivalents aux exportations (Messiga et al., 2012 ; Morel et al., 2014 ; Messiga et al., 2015)

Conséquences opérationnelles

Ces nouveaux indicateurs d'évaluation du P phytodisponible améliorent-ils le diagnostic multisite du comportement des cultures ?

Pour répondre à cette question, les neuf dispositifs de longue durée de la Figure 1 ont été utilisés pour étudier la corrélation entre la courbe de réponse du rendement du maïs en fonction du stock de P phytodisponible, évalué par les indicateurs (C_p, P_r) et leurs interrelations ou par l'extraction

chimique Olsen.



Pour un site donné, le rendement relatif en grain augmente rapidement avec C_p avant d'atteindre une valeur maximale. La courbe de réponse varie entre les essais (Figure 4-gauche). En intégrant le réapprovisionnement, progressif dans le temps, de la solution de sol en ions phosphates diffusibles provenant de la phase solide du sol, les neuf courbes se rapprochent et tendent à se superposer pour une durée de transfert sol-solution proche de la journée (Figure 4-droite). Pour juger la qualité des différents indicateurs, il est courant d'utiliser un critère statistique, le coefficient de détermination (R^2), qui rend compte de l'adéquation entre les valeurs calculées par la régression exponentielle (Éq. 2) et celles obtenues au champ. Le R^2 est bien moindre avec C_p ($R^2=0,40$) qu'avec $(Q_w + P_{r1600})$ ($R^2=0,68$) pour les 202 observations expérimentales des neuf essais. Ce dernier explique donc beaucoup mieux la variabilité expérimentale du rendement relatif. Cette courbe de réponse multisite est à comparer à celle obtenue avec l'extraction Olsen (Figure 1) également moins explicative et prédictive avec un R^2 de 0.63 pour seulement 181 observations expérimentales (absence de données de P-Olsen pour le Site 6). Ce résultat obtenu avec la culture du maïs a été également obtenu avec la culture de légumes comme le haricot vert et la carotte (Kouassi, 2011). Les indicateurs (C_p et P_r) et la modélisation de leurs interrelations améliore significativement le diagnostic multisite car la vitesse de réapprovisionnement de la solution par des ions phosphates de la phase solide du sol est prise en compte. Cette vitesse varie avec les propriétés physicochimiques des sols. Par exemple, pour une valeur donnée de C_p , elle est plus faible dans un sol sableux (sites S1 et S2 des Figures 1 et 4) que dans un sol argileux (sites S8 et S9 des Figures 1 et 4). Pour avoir un même stock d'ions phosphates diffusibles sur la phase solide du sol, il faut donc une valeur de C_p plus élevée dans un sol sableux que dans un sol argileux (Morel *et al.*, 2000).

L'évaluation fonctionnelle et mécaniste du P phytodisponible rend mieux compte que la méthode Olsen des courbes de réponse observées dans les essais de longue durée étudiés. Il faut cependant noter l'existence d'une variabilité expérimentale résiduelle dont l'origine est probablement multifactorielle. En dehors de considérations méthodologiques (la mise en suspension du sol affecte-t-elle la détermination de C_p et le transfert sol-solution des ions phosphates?) et de la question, déjà évoquée, de la contribution d'autres processus rhizosphériques, un autre facteur probablement important est celui de la contribution du sous-sol, sol situé en dessous de la couche labourée, à la nutrition phosphatée. Dans la grande majorité des études agronomiques, les relations entre le P phytodisponible du sol et le rendement relatif d'une culture donnée ont été établies en ne considérant que la couche labourée. La contribution à la nutrition des plantes du sous-sol est

implicitement négligée en raison d'une exploration racinaire beaucoup plus faible au-delà de la couche labourée du sol (Li *et al.*, 2017) et d'une teneur de P phytodisponible beaucoup plus faible que dans la couche labourée, généralement fertilisée (Boniface et Trocmé, 1988 ; Shepherd et Withers, 1999). Néanmoins, même si les sous-sols ne fournissent qu'une moindre part du P prélevé chaque année par la culture, cette part peut varier largement entre les sites, par exemple, selon que le sol est mince ou profond et que la couche superficielle de sol est asséchée et/ou avec une teneur déficiente de P phytodisponible (Kautz *et al.*, 2013). Des recherches sont donc nécessaires pour quantifier la contribution des sous-sols à la nutrition phosphatée des cultures et à sa variabilité en fonction des sols, des cultures et de l'historique de fertilisation phosphatée.

Quelle relation entre les propriétés du sol et le transfert sol-solution des ions phosphates diffusibles ?

Pour déterminer les paramètres (v , w , p) de l'Éq. (1), il faut disposer d'un laboratoire ayant reçu l'agrément de l'Agence de sûreté nationale et réservé à la manipulation de radio-isotopes dans un cadre réglementaire. Celui-ci ne peut être utilisé que par du personnel habilité, formé et muni d'une dosimétrie individuelle pour suivre l'exposition aux rayonnements ionisants, et être équipé de matériel de radioprotection. Ces contraintes, coûteuses à mettre en œuvre, ne permettent pas à un laboratoire d'analyses de sol en routine de déterminer les paramètres (v , w , p) empêchant le transfert des connaissances de la recherche vers le développement agricole.

Une alternative pour estimer les paramètres (v , w , p) sans avoir à les mesurer avec des ions phosphates radioactifs consiste à les estimer avec des analyses de substitution et des fonctions de pédotransfert (FPT), définies comme « *des outils, basés sur des relations statistiques, qui permettent d'estimer et de prédire des propriétés ou des comportements du sol, difficiles à mesurer directement, à partir d'autres propriétés du sol aisément déterminées en routine* ⁶⁴ »

Un premier travail d'élaboration de FPT des paramètres (v , w , p) a été réalisé pour 54 échantillons de la couche labourée de sols non carbonatés. Les principales propriétés du sol déterminant le transfert sol-solution des ions phosphates (Sharpley 1983 ; Burkitt *et al.*, 2006) ont été analysées. Il s'agit de la texture (5 fractions : argile (Arg), limon fins (Lf), limons grossiers, sables fins et sables grossiers), du pH, des teneurs en carbone organique, oxyhydroxides de fer et d'Al amorphes (extraction à l'oxalate d'ammonium (Fe-ox, Al-ox) et cristallisés (extraction citrate bicarbonate dithionite (Fe-cbd, Al-cbd)), la capacité d'échange cationique cobalthexamine (CEC) et du Ca échangeable. Ces analyses faites en routine sont décrites à l'adresse du laboratoire d'analyse de sols de l'INRAE⁶⁵. Une synthèse des résultats est présentée dans le Tableau 1.

Tableau 1. Moyenne, valeurs maximale (MAX) et minimale (MIN) des analyses physico-chimiques, réalisées en routine par les laboratoires d'analyses de sol, et des paramètres (v , w , p) de 54 échantillons de la couche labourée de sols cultivés en grandes cultures.

Analyses		Moyenne	MAX	MIN
Argile (< 2 µm)	g/kg	179	369	34
Limons fins (2/20 µm)	g/kg	230	409	4
Limons grossiers (20/50 µm)	g/kg	268	521	2
Sables fins (50/200 µm)	g/kg	117	239	19
Sables grossiers (200/2000 µm)	g/kg	205	909	2
Carbone (C) organique	g/kg	17,9	59,1	5,2
pH_eau		6,7	8,2	4,8
CEC cobalthexamine	cmol+/kg	10,1	23,6	1,7
Ca échangeable	cmol+/kg	9,4	23,5	1,1

⁶⁴ https://lorexplor.istex.fr/Wicri/Europe/France/InraMotsAgro/fr/index.php/Fonction_de_pédotransfert

⁶⁵ <https://www6.hautsdefrance.inrae.fr/las>

Analyses		Moyenne	MAX	MIN
Al-ox	g/kg	2,2	11,1	0,3
Fe-ox	g/kg	2,9	8,4	0,2
Al-cbd	g/kg	2,2	8,4	0,3
Fe-cbd	g/kg	9,3	24,8	0,2
Paramètre v de l'Éq. 1		10,9	24,7	0,1
Paramètre w de l'Éq. 1		0,39	0,70	0,19
Paramètre p de l'Éq. 1		0,26	0,69	0,13

Parmi les différents traitements statistiques réalisés, la FPT la plus performante pour décrire le paramètre v est l'équation non-linéaire suivante :

$$\ln(v) = 6:23 + 1:25 \times \ln(\text{Arg}) + 0:43 \times \ln(\text{Lf}/2) \quad \text{Éq. (2)}$$

Cette équation, qui rend compte de 93 % de la variabilité expérimentale, indique que le paramètre v augmente avec les teneurs en argile granulométrique et limon fin. Ce sont les particules les plus fines du sol qui développent les surfaces les plus importantes par unité de masse et réagissent avec les ions phosphates par des mécanismes précédemment décrits. Cette relation est parfaitement logique et témoigne simplement de l'importance bien connue des surfaces dans les processus de transfert des ions phosphates à l'interface solide-solution (Sigg et al., 2022). Ce résultat doit encore être confirmé en testant et validant l'Éq. (2) pour une autre série indépendante d'échantillons de sol non carbonaté. Pour les paramètres w et p, aucune FPT de mesures de substitution n'a pu être trouvée. L'explication probable est que les propriétés du sol analysées en routine ne rendent pas compte des processus sous-jacents à ces deux paramètres (répulsion électrostatique et diffusion des ions phosphates dans la phase solide du sol, cinétique chimique...). Il faudrait probablement considérer d'autres analyses, plus spécifiques, telle que la mesure de la charge électrique de surface, la porosité du sol...

Conclusions et perspectives

Le P extrait du sol avec les habituels réactifs chimiques n'évalue pas correctement le P-phytodisponible du sol, ce qui pénalise la qualité des prescriptions de la fertilisation P. L'analyse du fonctionnement des racines pendant l'absorption de P indique qu'il faut quantifier les ions phosphates dissous et leur transfert sol-solution par diffusion, processus très impliqué dans le réapprovisionnement de la solution de sol. A titre d'exemple d'application agronomique, l'utilisation de ces indicateurs a permis d'améliorer le diagnostic multisites du maïs. L'approche expérimentale proposée répond à la nécessité de gérer le P du sol sur la base de connaissances fonctionnelles et mécanistes favorables à la transition agroécologique (Papy et al., 2022). Cette approche devrait être généralisée à d'autres types de culture et de sol afin d'élaborer de nouveaux référentiels d'interprétation pour raisonner les apports de P et éviter plusieurs travers des référentiels actuels : entretenir des teneurs inutilement trop élevées et préjudiciables à l'environnement et à la biodiversité ; économiser l'utilisation d'engrais minéraux phosphatés de synthèse, source d'émission de CO₂ lors de leur fabrication.

Les travaux de recherche et de R&D sont à poursuivre et développer afin de permettre le déploiement à grande échelle des concepts et des indicateurs proposés et de construire les référentiels d'interprétation de la fertilisation phosphatée associés en particulier à la diversification végétale dans les démarches de transition agroécologique. On peut recommander les pistes suivantes.

- i) Étudier l'effet des conditions expérimentales (rapport volume-sur-masse des suspensions de sol ; force ionique de la solution ; etc.) sur la concentration et la spéciation des ions phosphates en solution et le transfert sol-solution par diffusion des ions phosphates.
- ii) Quantifier le rôle des autres processus rhizosphériques (autre que la diffusion sol-solution des ions phosphate) à la nutrition phosphatée des plantes. Sur ce point, le cas des légumineuses,

espèces peu étudiées malgré leur grand intérêt écologique et économique en agriculture et fer de lance de la diversification végétale dans le cadre de la transition agroécologique, devrait être privilégié.

iii) Évaluer la variabilité en fonction des systèmes sol-plante de la contribution à la nutrition phosphatée des couches de sol situées sous la couche labourée. Plus généralement, cette question est majeure et centrale pour construire des référentiels d'interprétation dans des situations sans labour (agriculture de conservation des sols ; prairies permanentes), puisque dans ces situations la teneur en P-phytodisponible varie avec la profondeur du sol de même que l'exploration racinaire.

iv) Généraliser l'étude et l'analyse du déterminisme physicochimique du transfert sol-solution par diffusion des ions phosphates pour élaborer par chimométrie les fonctions de pédotransfert des paramètres (v, w, p) pour de grandes séries de sols carbonatés et non carbonatés.

v) Poursuivre l'étude de la valorisation des matières fertilisantes organiques et en particulier de leur valeur fertilisante phosphatée.

Bibliographie

- Achat, D.L., Sperandio, M., Daumer, M.-L., Santellani, A.-C., Prud'Homme, L., Akhtar, M., Morel, C., 2014. Plant-availability of phosphorus recycled from pig manures and dairy effluents as assessed by isotopic labeling techniques. *Geoderma*, 232-234, 24–33.
- Barber, S.A., 1995. *Soil nutrient bioavailability: a mechanistic approach*. New York USA: John Wiley and Sons.
- Barbier, G., Fardeau, J.-C., Marini, P., 1971. Sur la diffusivité des ions P du sol. *Annales Agronomiques*, 22(3), 309–342.
- Barrow, N.J., 2023. Equations to describe the amount and rate of sorption. *European Journal of Soil Science*, 74:e13355.
- Bolan, N.S., 1991. A critical review on the role of mycorrhizal fungi in the uptake of phosphorus by plants. *Plant and Soil*, 134:189–207.
- Boniface, R., Trocmé, S., 1988. Enseignements fournis par des essais de longue durée sur la fumure phosphatée et potassique. Essais sur la fumure phosphatée. pp. 279–401. In: *Phosphore et potassium dans les relations sol-plante: conséquences sur la fertilisation*. INRA Editions, Paris
- Bühler, S., Oberson, A., Sinaj, S., Friesen, D.K., Frossard, E., 2003. Isotope methods for assessing plant available phosphorus in acid tropical soils. *European Journal of Soil Science*, 54, 605–616
- Burkitt, L.L., Gourley, C.J.P., Hannah, M.C., Salk, P.W.G., 2006. Assessing alternative approaches to predicting soil phosphorus sorption. *Soil Use and Management*, 22, 325–333.
- Chapman, P.J, Edwards A.C., Shand, C.A., 1997. The phosphorus composition of soil solutions and soil leachates: Influence of soil: solution ratio. *European Journal of Soil Science*, 48, 703-710.
- Chardon, W.J., Blaauw, D. 1998. Kinetic Freundlich equation applied to soils with a high residual content. *Soil Science*, 163 30–35.
- Cade-Menun, B.J. 2017. Characterizing P forms in cropland soils with solution ^{31}P -NMR: past studies and future research needs. *Chemical and Biological Technologies in Agriculture* 4, 1–12.
- Ceulemans, T., Stevens, C.J., Duchateau, L., Jacquemyn, H., Gowing, D.J.G., Merckx, R., Wallace, H., van Rooijen, N., Goethem, T., Bobbink, R., Dorland, E., Gaudnik, C., Alard, D., Corcket, E., Muller, S., Dise, N.B., Dupre, C., Diekmann, M., Honnay, O., 2014. Soil phosphorus constrains biodiversity across European grasslands. *Global Change Biology*, 20(12), 3814-3822.
- Cordell, D., White, S. 2011. Peak Phosphorus: Clarifying the key issues of a vigorous debate about long-term phosphorus security. *Sustainability*, 3(10), 2027-2049.
- Dorioz, J.-M., Wang, D., Poulencard, J., Trévisan, D., 2006. The effect of grass buffer strips on phosphorus dynamics—A critical review and synthesis as a basis for application in agricultural landscapes in France. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 117, 4–21
- Dorozhkin, S. V. 2009. Review. Calcium Orthophosphates in Nature, Biology and Medicine. *Materials*, 2, 399-498.
- Fardeau, J.C., 1981. *Cinétiques de dilution isotopique et phosphore assimilable des sols*. Thèse de Doctorat d'Etat. Université Pierre et Marie Curie, Paris 6.
- Fardeau, J.C., 1993. Available soil phosphate: its representation by a functional multiple compartment model. *Agronomie*, 13(4), 317–331.
- Fardeau, J.C., Morel, C., Jappe, J., 1985. Cinétique d'échange des ions phosphate dans les systèmes sol-solution. Vérification expérimentale de l'équation théorique. *Comptes Rendus de l'Académie des Sciences, Paris*, t 300, Série III 8, 371–376.
- Fardeau, J.C., Morel, C., Boniface, R., 1988. Pourquoi choisir la méthode Olsen pour estimer le phosphore « assimilable » des sols? *Agronomie*, 8, 577–584.
- Fardeau, J.C. Morel, C., Boniface, R., 1991. Phosphate ion transfer from soil to soil solution: kinetic parameters. *Agronomie*, 11(9), 787–797.
- Fourrie, L., Butler, F., Castillon, P., Hanocq, D., Fougère, M., Levasseur, P., Gascuel, C., Dorioz, J.M., Morel, C., Raison, C., Aubert, C., 2011. Le phosphore d'origine agricole: diagnostics et solutions pour limiter les transferts vers le milieu aquatique. *Innovations Agronomiques*, 17,15–32.

- Frossard, E., Fardeau, J.C., Brossard, M., Morel, J.L., 1994. Soil isotopically exchangeable phosphorus: a comparison between E and L values. *Soil Science Society of America Journal*, 58, 846–851.
- Fuchs, J., Générumont, S., Houot, S., Jardé, E., Ménasseri, S., Mollier, A., Morel, C., Parnaudeau, V., Pradel, M., Vieublé, L., 2015. Effets agronomiques attendus de l'épandage des Mafor sur les écosystèmes agricoles et forestiers. pp. 364–567. In: Houot S., Pons M.N., Caillaud M.A., Savini I., Tibi A. (Ed.). *Expertise scientifique collective, INRA-CNRS-Irstea (France). Rapport final de l'ESCO "Matières fertilisantes d'origine résiduaire"* – octobre 2014.
- Gérard, F., 2016. Clay minerals, iron/aluminum oxides, and their contribution to phosphate sorption in soils: a myth revisited. *Geoderma*, 262, 213–226.
- Hinsinger, P., Bengough, A.G., Vetterlein, D., Young, Y.M., 2009. Rhizosphere: biophysics, biogeochemistry and ecological relevance. *Plant and Soil* 321, 117–152.
- Hinsinger, P., Brauman, A., Devau, N., Gérard, F., Jourdan, C., Laclau, J.M., Le Cadre, E., Jaillard, B., Plassard, C., 2011. Acquisition of phosphorus and other poorly mobile nutrients by roots. Where do plant nutrition models fail? *Plant and Soil*, 348, 29–61. <https://doi.org/10.1007/s11104-011-0903-y>
- Jordan-Meille, L., Rubæk, G., Ehler, P., Genot, V., Hofman, G., Goulding, K., Recknagel, J., Provolo, G., Barraclough, P., 2012. An overview of fertilizer-P recommendations in Europe: soil testing, calibration and fertilizer recommendations. *Soil Use and Management*, 28(4), 419–435.
- Kautz, T., Amelung, W., Ewert, F., Gaiser, T., Horn, R., Jahn, R., Javaux, M., Kemna, A., Kuzyakov, Y., Munch, J.-C., Pätzold, S., Peth, S., Scherer, H.W., Schloter, M., Schneider, H., Vanderborght, J., Vetterlein, D., Walter, A., Wiesenberger, G.L.B., Köpke, U., 2013. Nutrient acquisition from arable subsoils in temperate climates: A review. *Soil Biology and Biochemistry* 57, 1003–1022.
- Kouassi, A.-S., 2011. Ça phosphore sur la fertilisation des légumes ! 2011. *Unilet infos* 139, 14-16.
- Li, H., Mollier, A., Ziadi, N., Shi, Y., Parent, L.-É., Morel, C., 2017. The long-term effects of tillage practice and phosphorus fertilization on the distribution and morphology of corn root. *Plant Soil*, 412, 97–114.
- Mendez, J.C., and Hiemstra, T., 2020. Ternary Complex Formation of Phosphate with Ca and Mg Ions Binding to Ferrihydrite: Experiments and Mechanisms. *ACS Earth Space Chemistry* 4, 545–557.
- Messiga, A.J., Ziadi, N., Plénet, D., Parent, L.-É., Morel, C., 2010. Long-term changes in soil phosphorus status related to P budgets under maize monoculture and mineral P fertilization. *Soil Use and Management*, 26: 354–364.
- Messiga, A.J., Ziadi, N., Bélanger, G., Morel, C., 2012. Process-based mass-balance modeling of soil phosphorus availability in a grassland fertilized with N and P. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 92(3), 273–287.
- Messiga, A.J., Ziadi, N., Mollier, A., Parent, L.-É., Schneider, A., Morel, C., 2015. Process-based mass-balance modeling of soil phosphorus availability: Testing different scenarios in a long-term maize monoculture. *Geoderma*, 243, 41–49.
- Mollier, A., Denoroy, P., Morel, C., 2019. Évaluation de la disponibilité et la gestion du phosphore dans les agroécosystèmes : avancées scientifiques et techniques. *Agronomie, Environnement & Sociétés*, 9(1), 87–98.
- Morel, C., 2002. *Caractérisation de la phytodisponibilité du phosphore du sol par la modélisation du transfert des ions phosphate entre le sol et la solution. Mémoire d'habilitation à diriger des recherches*, INPL-ENSAIA Nancy.
- Morel, C., Plenchette, C., Fardeau, J.-C., 1992. The management of phosphate fertilization in wheat crops. *Agronomie*, 12(8), 565–579.
- Morel, C., Plenchette, C., 1994. Is the isotopically exchangeable phosphate of a loamy soil the plant-available P. *Plant and Soil*, 158, 287–297.
- Morel, C., Tunney, H., Plénet, D., Pellerin, S., 2000. Transfer of phosphate ions between soil and solution: Perspectives in soil testing. *Journal of Environmental Quality*, 29(1), 50–59.
- Morel, C., Ziadi, N., Messiga, A., Bélanger, G., Denoroy, P., Jeangros, B., Jouany, C., Fardeau, J.-C., Mollier, A., Parent, L.-É., Proix, N., Rabeharisoa, L., Sinaj, S., 2014. Modeling of phosphorus dynamics in contrasting agroecosystems using long-term field experiments. *Canadian Journal of Soil Science*, 94(3), 377–387.
- Morel, C., Denoroy, P., Mollier, A., Pellerin, S., Sinaj, S., Ziadi, N., 2017. Cycle biogéochimique du phosphore. pp 130–139. In: *Guide de la fertilisation raisonnée. Agriproduction Productions végétales et Grandes cultures*. Editions France Agricole. Paris, France. ISBN: 978-2-85557-412-7
- Morel, C., Plénet, D., Mollier, A., 2021. Calibration of maize phosphorus status by plant-available soil P assessed by common and process-based approaches. Is it soil-specific or not. *European Journal of Agronomy*, 122, 126174.
- Némery, J., Garnier, J., Morel, C., 2005. Phosphorus budget in the Marne Watershed (France): urban vs. diffuse sources, dissolved vs. particulate forms. *Biogeochemistry*, 72(1), 35–66.
- Nriagu, J.O., Moore, P.B., 1984. *Phosphate minerals*. Springer Verlag. ISBN 3-54061275767
- Obersteiner, M., Penuelas, J., Ciais, P., van der Velde, M., Janssens, I.A., 2013. The phosphorus trilemma. *Nature Geoscience*, 6(11), 897–898.
- Papy, F., Lemaire, G., Malezieux, E., Duru, M., 2022. L'agronomie en interaction avec les autres disciplines. pp. 165–210. In: *La fabrique de l'agronomie. De 1945 à nos jours*. Boiffin J., Doré T., Kockmann F., Papy F., Prévost P., coord. Éditions Quæ, Versailles, 498 p.

- Pellerin, S., Augusto, L., Bakker, M., Denoroy, P., Hinsinger, P., Jaillard B., Jordan-Meille L., Le Cadre, E., Lineres, M., Mollier, A., Morel, C., Saur, É., Schneider A., 2009. Sol et nutrition des plantes: nouvelles recherches sur la biodisponibilité des éléments minéraux. pp. 94–98. In Stengel, P., Balesdent, J., Bruckler, L., (Eds), *Le sol*. Paris (France) Editions Quae.
- Pellerin, S., Recous, S., Boiffin, J., 2014. De la fertilisation raisonnée à la maîtrise des cycles biogéochimiques. pp. 17–41. In S. Pellerin, F. Butler, C. Van Lathem (coord.), *Fertilisation et Environnement : Quelles pistes pour l'aide à la décision ?* Paris, France, Editions Quae.
- Pinay, G., Gascuel, C., Menesguen, A., Souchon, Y., Le Moal, M., Levain, A., L., Etrillard, C., Moatar, F., Pannard, A., Souchu, P., 2017. *L'eutrophisation. Manifestations, causes, conséquences et prédictibilité*. Synthèse de l'Expertise scientifique collective. INRA – Ifremer - Irstea CNRS (France), 144 pages. hal-02791790
- Plassard, C., Le Cadre É., Marsden, C., Trap, J., Hinsinger, P., 2017. Le sol et ses facteurs de fertilité. In : *Guide de la fertilisation raisonnée*. Coord. B. Colomb. Agriproduction Productions végétales et Grandes cultures. Editions France Agricole. Paris, France. 68–92. ISBN : 978-2-85557-412-7.
- Plenchette, C. 1982. Les endomycorhizes à vésicules et arbuscules : un potentiel à exploiter en agriculture. *Phytoprotection* 63, 86–108.
- Plenchette, C., Clermont-Dauphin, C., Meynard, J.-M., Fortin, J.A., 2005. Managing arbuscular mycorrhizal fungi in cropping systems. *Canadian Journal of Plant Science*, 85, 31-40.
- Pypers, P., Van Loom, L., Diels, J., Abaidoo, R., Smolders, E., Merckx, R., 2006. Plant-available P for maize and cowpea in P-deficient soils from the Nigerian Northern Guinea savanna – Comparison of E- and L-values. *Plant and Soil*, 283, 251–26.
- Raguet, P. 2023. *Long-term mineralization of organic phosphorus in agricultural soils: evaluation and control factors*. Thèse de Doctorat, Université Bordeaux.
- Raguet, P., Cade-Menun, B., Mollier, A., Abdi, D., Ziadi, N., Karam, A., Morel, C. 2023. Mineralization and speciation of organic phosphorus in a sandy soil continuously cropped and phosphorus-fertilized for 28 years. *Soil Biology and Biochemistry*, 178, 108938.
- Sharpley, A.N., 1983. Effect of soil properties on the kinetics of phosphorus Desorption. *Soil Science Society of American Journal*, 47:462-467.
- Shepherd, M.A., Withers, P.J., 1999. Applications of poultry litter and triple super phosphate fertilizer to a sandy soil: effects on soil phosphorus status and profile distribution. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 54, 233–242.
- Schneider, A., Morel, C., 2000. Relationship between the isotopically exchangeable and resin-extractable phosphate of deficient to heavily fertilized soil. *European Journal of Soil Science*, 51, 709–715.
- Senthilkumar, K., Nesme, T., Mollier, A., Pellerin, S., 2012. Conceptual design and quantification of phosphorus flows and balances at the country scale: The case of France. *Global Biogeochemical Cycles*, 26(2), GB2008.
- Sigg, L., Behra, P., Stumm, W., 2022. *La Chimie des milieux aquatiques*. 5ème édition. Dunod. EAN 9782100843671.
- Steinfurth, K., Hirte, J., Morel, C., Buczko, U., 2021. Conversion equations between Olsen-P and other methods used to assess plant available soil phosphorus in Europe – A review. *Geoderma*, 401, 115339.
- Stroia, C. Jouany, C., Morel, C., 2007. Dynamics of diffusive soil phosphorus in two grassland experiments determined both in field and laboratory conditions. *Agriculture Ecosystems & Environment*, 119(1-2), 60–74.
- Tang, X., Ma, Y.B., Hao, X.Y., Li, X.Y., Li, J.M., Huang, S.M., Yang, X.Y. 2009. Determining critical values of soil Olsen-P for maize and winter wheat from long-term experiments in China. *Plant and Soil*, 323:143–151.
- Véricel, G., Bouthier, A., Helias, R., Soenen, B., 2018. Activateurs de la vie biologique des sols. Des résultats peu probants. *Perspectives Agricoles*, 454, 32–35.
- Wang, L., Rengel, Z., Zhang, K., Jin, K., Lyu, Y., Zhang, L. Cheng, L., Zhang, F., Shen, J., 2022. Ensuring food security and resource sustainability: insights into the rhizosphere. *iScience*, 25, 104168.
- Wang, Y., Krogstad, T., Clarke, J.L., Hallama, M., Øgaard, A.F., Eich-Greatorex, S., Kandler, E., Clarke, N., 2016. Rhizosphere Organic Anions Play a Minor Role in Improving Crop Species' Ability to Take Up Residual Phosphorus (P) in Agricultural Soils Low in P Availability. *Frontiers in Plant Science*, 7, 1664, 1–14.
- Zehetner, F., Wuenscher, R., Peticzka, R., Unterfrauner, H., 2018. Correlation of extractable soil phosphorus (P) with plant P uptake: 14 extraction methods applied to 50 agricultural soils from Central Europe. *Plant Soil and Environment*, 64, 192–201.
- Zhu, J., Li, M., Whelan, M., 2018. Phosphorus activators contribute to legacy phosphorus availability in agricultural soils: A review. *Science of The Total Environment*, 612, 522–537.
- Ziadi, N., Whalen, J., Messiga, A., Morel, C., 2013. Assessment and modeling of soil available phosphorus in sustainable cropping systems. *Advances in Agronomy*, 122, 85-126



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 – réglementation)

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.

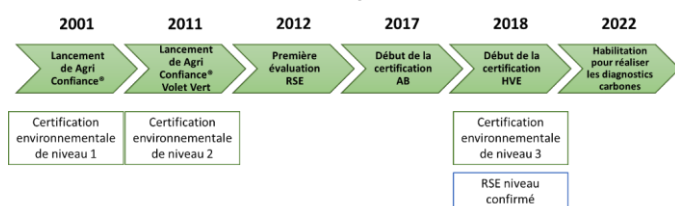


Figure 1 : Démarche environnementale de la SCARA

Afin d'accompagner les agriculteurs, la SCARA choisit en 2001 le référentiel Agri Confiance® (NF V01-005) 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 enjeu 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	Raisonnement 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.

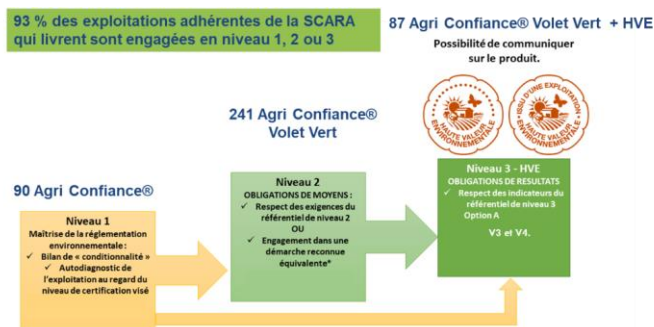


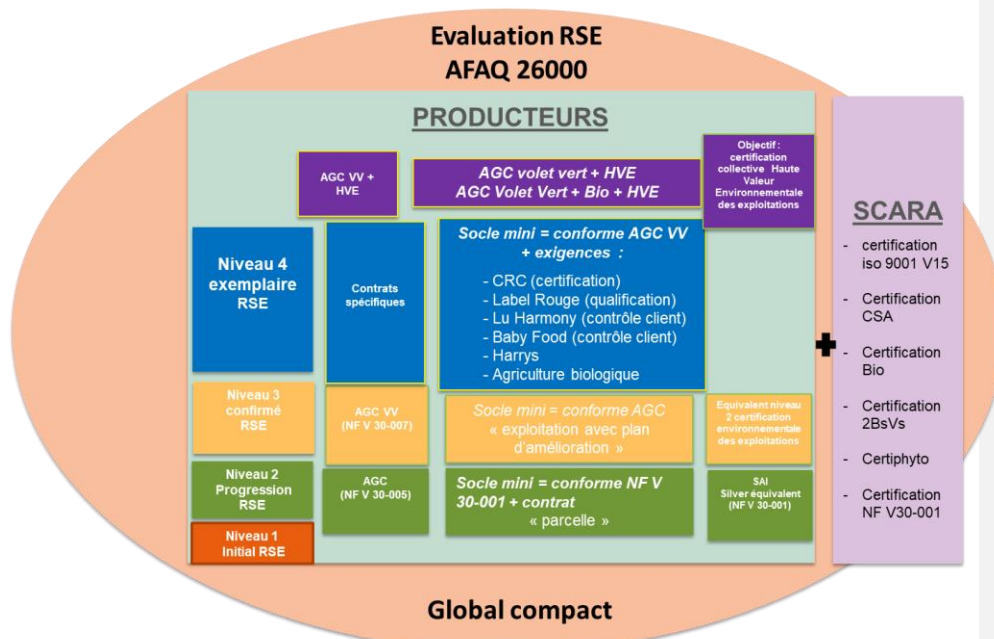
Figure 2 : Les trois niveaux de la certification environnementale. 93 % des exploitations de la SCARA sont engagées dans une démarche environnementale dont 87 en HVE. En 2023, 20 % des adhérents livreurs sont engagés en Agri Confiance® ; 54% en Agri Confiance volet Vert et 19% sont Haute Valeur Environnementale.

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



filiales. 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.

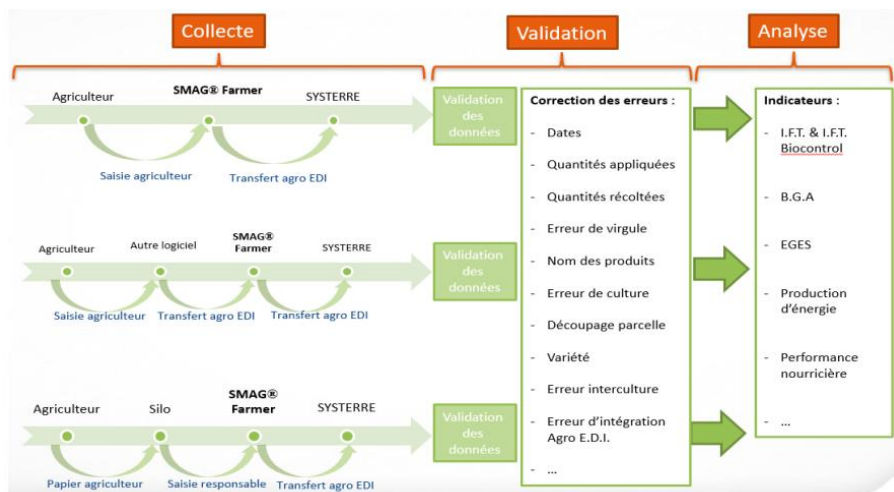


Figure 4 : Méthodes de collecte, validation et analyse des données issues des fiches parcelaires. EGES : émissions de gaz à effet de serre, IFT : indice de fréquence de traitement, BGA : Balance Globale Azotée.

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 (surfaciques 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 Soulié. 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.

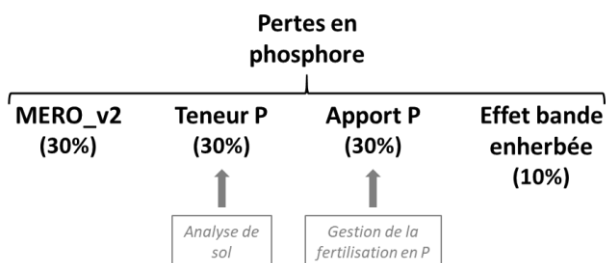


Figure 5 : Schéma résumant la construction de l'indicateur Pertes en phosphore. MERO_v2 est la nouvelle version de l'indicateur de la Maîtrise de l'érosion du sol développé dans la méthode MASC 2.0 (Multi Attribute tool for the assessment of the Sustainability of Cropping systems) (Craheix et al., 2012).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

Ces indicateurs d'impact prédictifs viennent enrichir la liste de 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).

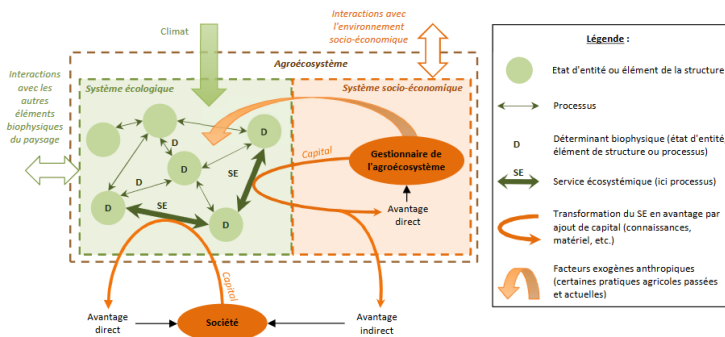


Figure 6 : Représentation du cadre conceptuel de l'étude EFESE, appliqué à la fourniture de deux services écosystémiques : l'un rendu directement à la société, l'autre rendu directement au gestionnaire de l'agroécosystème et dont la société bénéficie indirectement.

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.

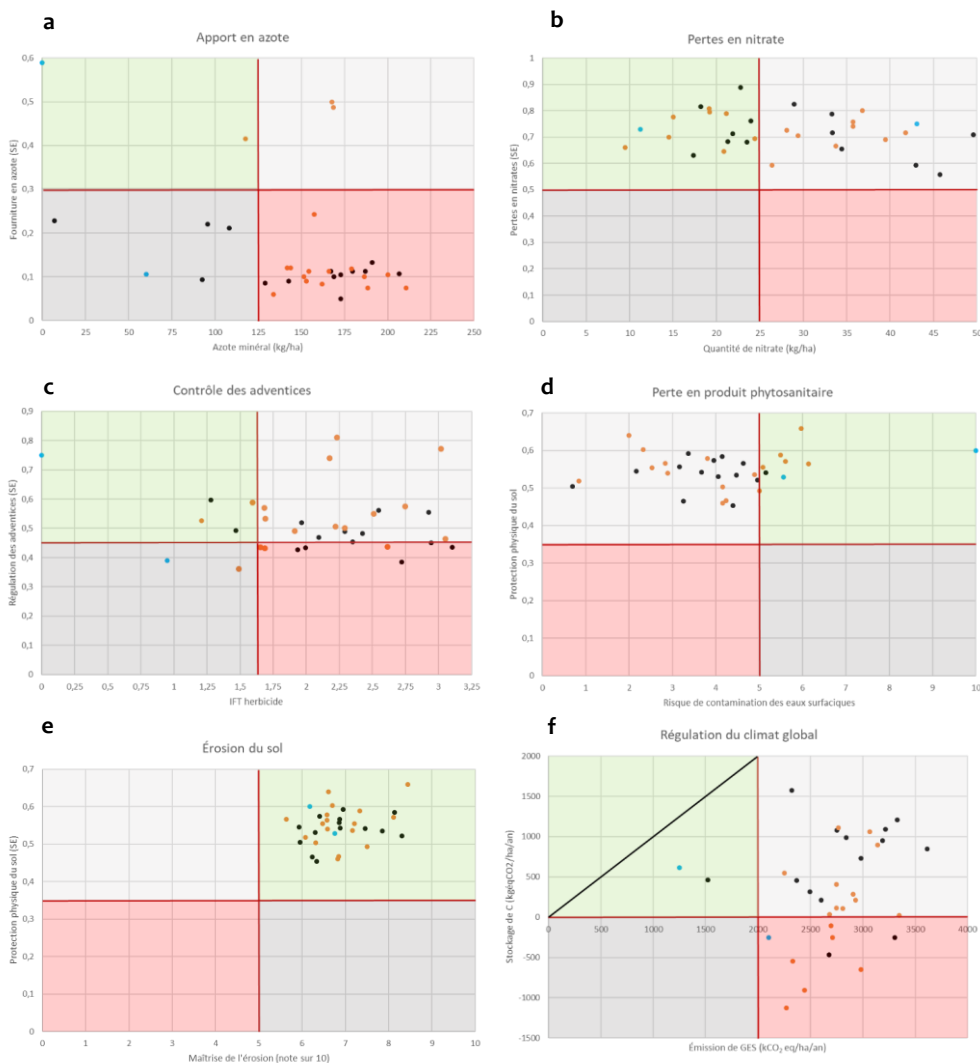


Figure 7 : Évaluation conjointe de 6 principaux thèmes environnementaux : a) Apport en azote ; b) Pertes en nitrate ; c) Contrôle des adventices ; d) Pertes en produit phytosanitaire ; e) Érosion du sol et f) Régulation du climat global. Les points représentent la situation de chaque exploitation pour 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

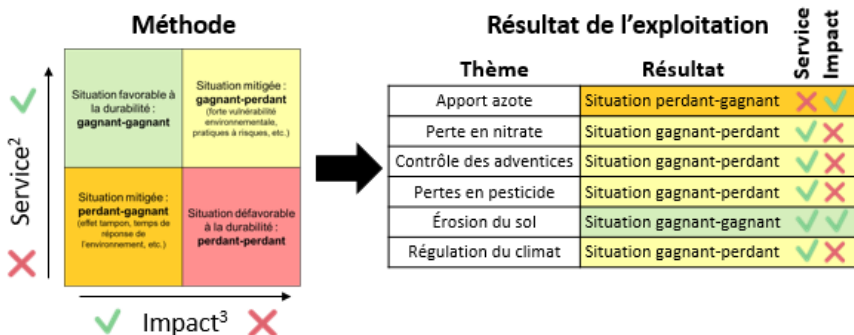
Unités	RCeso 0-10	Rcair vol 0-10	NO3 kg N/ha	Bilan C kg eqCO2/ha	Structure sol /	Paysage /	Production d'énergie MJ/ha	Marge brute €/ha	Temps travail h/ha
Voire exploitation	4,8	5,4	29	2114	0,66	0,55	148359	1	5,2
Référence ¹	5,8	8,5	19	1654	0,67	0,60	142304	1053	3,0

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

- o Apport d'azote : via l'intégration de légumineuses
- o Perte en nitrate : gestion de la succession et des cultures piège à nitrate
- o Contrôle des adventices : gestion des adventices via l'alternance date de semis et étouffement par le couvert végétal
- o Pertes en pesticide : limite des pertes en pesticides grâce au couvert végétal
- o Érosion du sol : gestion des résidus de culture et effet couvert végétal
- o 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.

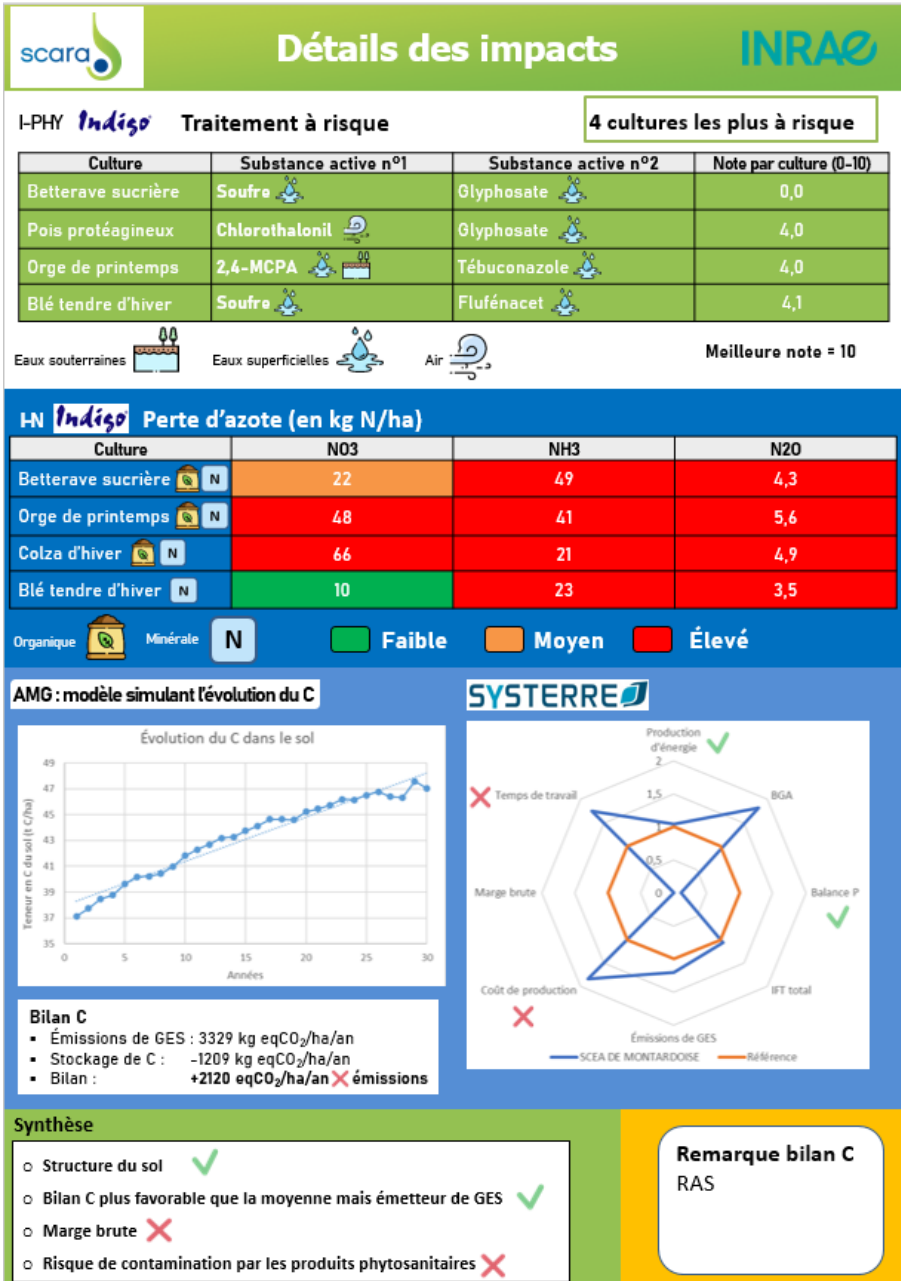


Figure 9 : Exemple de fiche de synthèse résumant les résultats de l'évaluation de la durabilité et de certains indicateurs pour une des exploitations de l'échantillon.

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 aux changements des pratiques culturales. Ceci pourrait être envisagé dans le cadre des paiements pour services environnementaux. Ces derniers rémunèrent 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 Agricuture 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., Ripoché, D., Ruget, F., Rulleau, B., Rush, A., Salles, J.-M., Sauvant, 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 FESE. 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 pondération 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)



TÉMOIGNAGE

Des indicateurs opérationnels de la biologie des sols, base d'une prestation de diagnostic-conseil auprès des agriculteurs

Christian Barnéoud*¹

* agro-pédologue à la Chambre Régionale Bourgogne Franche Comté
¹ Avec la contribution de Xavier Salducci, directeur du laboratoire Celesta-lab
Contact auteur : christian.barneoud@bfc.chambagri.fr

Introduction

Les êtres vivants du sol rendent de nombreux services : nutrition des plantes, recyclage de matière organique, structure du sol, régulation des bioagresseurs ... mais ils sont encore peu pris en compte dans les systèmes agricoles même si la notion de fertilité biologique des sols suscite de plus en plus d'intérêt chez les agriculteurs. La prise en compte de la qualité biologique des sols cultivés qui, selon R.Chaussod (1996) « peut apparaître comme la résultante d'un ensemble de facteurs environnementaux (type de sol, climat) et anthropiques (systèmes de culture, pratiques culturales) » est aujourd'hui un enjeu majeur en agroécologie : disposer d'indicateurs pertinents et accessibles, adossés à des référentiels d'interprétations solides constitue un préalable indispensable pour poser un diagnostic à visée opérationnelle pour le monde paysan (Chaussod et Nouaïm, 2019) qui se fait de plus en plus « hypnotiser » par une multitude de commerciaux disposant de « solutions » toutes plus miraculeuses les unes que les autres pour optimiser, dynamiser la « vie » de leurs sols.

L'écologie du sol a mis en exergue l'extraordinaire réservoir de biodiversité dans les sols et permis à l'agroécologie d'impulser des programmes très conséquents de recherche-action pour identifier des indicateurs puis bâtir des nouveaux référentiels d'interprétation, tel que le projet Agrinov INRAe (Ranjard, 2018) puis la mise en place du Réseau d'Expérimentation et de Veille à l'innovation Agricole (REVA) sous l'impulsion de l'OFSV (Observatoire Français des Sols Vivants). En parallèle de ces vastes programmes, la Chambre régionale d'agriculture de Bourgogne Franche-Comté a proposé, dès les années 2010 dans des programmes d'accompagnement à destination de ses agents et/ou des agricultrices et agriculteurs, d'utiliser des indicateurs de la fertilité biologique dont les référentiels d'utilisation étaient déjà étoffés, opérationnels, et surtout pécuniairement acceptables. Ces indicateurs analytiques étant à l'époque, proposés par un seul laboratoire français d'analyses de sols (Celesta-lab), objet de l'encadré n°1, c'est tout naturellement qu'une collaboration s'est instaurée pour construire de la pédagogie autour de la fertilité biologique et de ses indicateurs analytiques. La 14^{ème} rencontre du COMIFER-GEMAS a par ailleurs conforté cette ligne de programme d'actions grâce à une communication sur la pertinence des indicateurs analytiques de la fertilité biologique des sols qui stipulait : « en complément du carbone organique et de l'azote total, la biomasse microbienne, le fractionnement granulométrique de la MO et le carbone KMnO₄ semblent les indicateurs les plus pertinents sur le jeu de données étudié » (Valé et al, 2019).

Commencer par être en accord sur les piliers de la fertilité des sols agricoles

Aborder les indicateurs analytiques de la fertilité des sols avec un public aussi diversifié que des agricultrices-agriculteurs, agents de chambres d'agriculture, techniciennes-techniciens de coopératives agricoles, enseignantes-enseignants et apprenantes-apprenants de lycées agricoles nécessite au moins de s'accorder sur cette notion très subjective de fertilité d'un sol agricole. Dans des cycles de formation auxquels participent les publics précités, aborder la notion de fertilité globale d'un sol sous un angle très ancien et actuel permet de vérifier la convergence des points de vue.

La notion de fertilité d'un sol

A travers une version antique de description du sol par un élève d'Hippocrate (env. 400av. J-C, cité par BOULAIN (1989)), « La terre est l'estomac des plantes, qui en reçoivent la nourriture sous forme prête à la digestion. Elle possède une quantité immense de forces qui nourrissent les plantes. La fertilité, l'infertilité d'un sol, dépendent (,,,) de l'humidité nécessaire aux plantes dans un sol donné. Les caractéristiques du sol varient facilement d'un endroit à l'autre ... », il est intéressant de constater que les concepts de compartiments vivants en capacité de digérer des produits organiques qui assurent peu ou prou le cocktail nutritionnel des plantes apparaissent de manière presque évidente, en tout cas à travers l'écrit.

Le Larousse Agricole propose une définition de la fertilité d'un sol pour un climat donné « comme l'aptitude [d'un sol] à assurer, de façon régulière et dans des conditions normales de production, de bonnes conditions de croissance des cultures. Elle résulte d'une combinaison de composantes physiques, chimiques et biologiques du sol, qui déterminent l'apport d'éléments nutritifs aux plantes et les conditions de croissance et de fonctionnement des racines ». Et en effet, lorsque la question « finalement, c'est quoi un sol agricole fertile ? » est posée, les réponses généralement exprimées traduisent assez bien ce qui précède : « un sol fertile, c'est un sol qui nous plait, car les rendements attendus sont là, il y a un vrai retour sur investissement et il semble mieux résister que d'autres parcelles à l'aléa climatique ». Effectivement, la fertilité d'un sol agricole se réfère à sa capacité à fournir des conditions optimales pour la croissance et le développement des plantes cultivées qui dépendent de facteurs physiques, chimiques et biologiques, donc organiques, qui interagissent entre eux.

Une schématisation des piliers de la fertilité des sols, à visée pédagogique

Les bases de la fertilité d'un sol agricole étant posé, c'est souvent une visualisation graphique (Figure 1) qui permet de consolider dans les esprits les interactions entre les compartiments. Dans le schéma, placer le compartiment vivant au centre de cet édifice pyramidal est aussi une manière pragmatique de sensibiliser encore un peu plus l'impact qu'il peut subir.

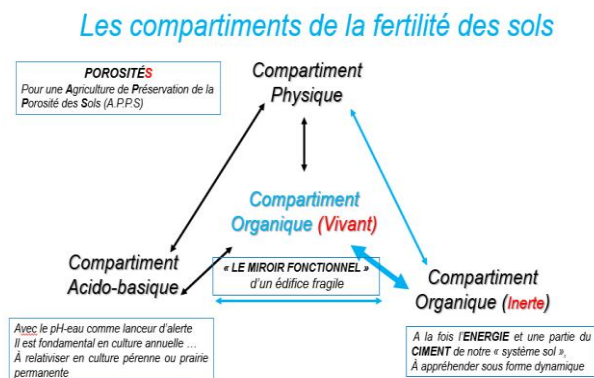


Figure 1 : Les compartiments de la fertilité des sols

Pour traduire toute la complexité du compartiment physique, le terme porosité apparaît comme suffisamment pédagogique dès lors qu'il est rappelé qu'on se réfère bien à cette fonction des sols d'assurer à la fois des transferts +/- rapides des eaux pluviales (au moins dans les premiers décimètres de sol) et à la fois d'en retenir une partie pour la rétrocéder à l'ensemble des organismes vivants du sol : en quelque sorte la défense de l'Agriculture de Préservation de la Porosité des Sols ! Les indicateurs pertinents à mettre alors en jeu pour comprendre ce compartiment sont

l'observation du sol (profil-3D, profil-vrai, test bêche) même si des indicateurs analytiques ou des mesures au champ sont toujours possibles.

Le compartiment acido-basique à travers le prisme de la fertilité biologique du sol peut être appréhendé avec simplicité par le pH du sol ... en tant que lanceur d'alerte ! : le postulat proposé est que, en cultures de plantes annuelles, disposer d'un pH-eau se situant au moins autour de 6.5 en période d'activités biologiques est le minimum requis à atteindre/entretenir pour offrir au compartiment vivant du sol un environnement favorable à son fonctionnement en particulier vis-à-vis de sa fonction nitrificatrice (Kockmann et al, 1990).

Le compartiment organique évoque évidemment les Matières Organiques du Sol (MOS) en étroite liaison avec le compartiment vivant : pour en comprendre la complexité et surtout les leviers agronomiques à mettre en jeu en cas de « déficit organique », une vision dynamique des MOS permet de comprendre leur rôle fondamental qui va au-delà de « mon sol est pauvre en MO, je fais comment pour augmenter ma teneur ? ».

Expliquer la complexité des MOS en décomposant avec quatre questions.

Ainsi pour tenter de faire comprendre la complexité des MOS sans pour autant entrer dans les détails de cette organisation compliquée et variée, rien de plus simple que de poser 4 questions :

Question-1 : C'est quoi la MO dans un sol ?

Répondre à cette question dans le cadre d'une formation sur le sujet, c'est faire émerger dans un groupe ce qui se cache derrière les mots *matières organiques d'un sol agricole* et pour faciliter les réponses, il est proposé en préalable, le postulat que les MOS peuvent se scinder en quatre compartiments qu'il conviendra d'identifier. Cette première question permet de passer de la MO en tant que donnée chiffrée (un %) prise dans une analyse de sol à quatre entités, représentées par quatre carrés colorés dans la figure 2 (les compartiments des MOS).

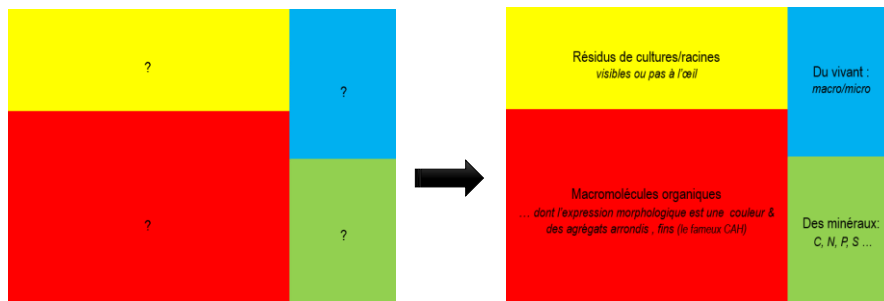


Figure 2 : Les compartiments des Matières organiques du sol

- Carré jaune : le domaine de l'inerte visible à l'œil (voire avec une loupe de botaniste) : racines, résidus de cultures ... C'est la MO libre dans la matrice minérale.
- Carré bleu : la MO-vivante (ver de terre, insectes, bactéries champignons, algues, racines...); un compartiment nommé aussi « biomasse microbienne »
- Carré rouge : en quelque que sorte l'expression morphologique (agrégats terreux +/- arrondis et foncés) du complexe organo-minéral du sol, correspondant à des macromolécules humiques complexes et généralement présentés par le vocable « humus ».
- Carré vert : les éléments minéraux simples, issus de la transformation ultime (=minéralisation) des MO du sol Les éléments minéraux (CHNOPS) assimilables.

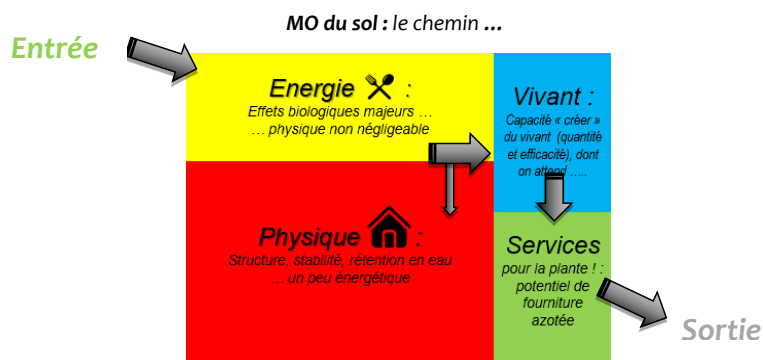
Question-2 : la MO du sol, à quoi ça sert ?

Les MOS ayant été schématiquement identifiées, la deuxième question « à quoi ça sert » permet d'aborder les interactions entre les différents compartiments et d'entrevoir les aspects dynamiques de ces MOS :

- A quoi sert le jaune ? : la nourriture donc l'énergie du système sachant que les exsudats racinaires assurent aussi une partie importante de cette énergie, notamment vis-à-vis du compartiment microbien.
- A quoi sert le rouge ? : c'est l'habitat protecteur, qui assure l'air, les transferts d'eau
- A quoi sert le bleu ? : le vivant dans toute sa diversité, source potentielle de services.
- A quoi sert le vert ? : une partie des services rendus par le vivant avec une action qu'on espère bénéfique pour les plantes cultivées.

En reprenant le carré des compartiments des MOS (Figure 3), il devient plus aisé de faire comprendre que, dans un sol (cultivé), la MO entre par le compartiment jaune (résidus de cultures, racines...) : on apporte de la nourriture/énergie au système sol qui va nourrir le compartiment vivant (bleu). L'élément énergétique étant le carbone, ces MO-libres vont progressivement perdre du carbone (sous l'action des organismes du sol), se modifier, se réorganiser, évoluer en taille et forme biochimique pour intégrer, après un temps long le compartiment rouge. Les micro-organismes du sol, bénéficiant de cet apport énergétique régulier (racines, résidus de cultures ...) vont se développer, respirer, se renouveler plus ou moins efficacement selon la qualité énergétique potentielle de ces matières organiques entrantes et les conditions du milieu (air/eau/pH). Si cette efficacité à transformer les MOS est au rendez-vous, le fruit de ces activités complexes des micro-organismes du sol sera la fourniture (= libération) d'éléments minéraux indispensables à la plante (azote, phosphore, soufre...) : le compartiment vert pourra être considéré comme celui des services rendus par les organismes du sol (nourrir son sol permet de nourrir les micro/macro-organismes du sol qui en retour offrent des services : azote, phosphore, mais aussi porosité, agrégations et régulation des maladies/pathogènes). Ainsi, lors d'une formation sur « le sol et ses MO » j'ai été ravi de constater la compréhension des fonctions des compartiments des MOS quand un agriculteur jurassien m'interpelle en disant « finalement, dans la méthanisation, c'est le compartiment jaune qui sert à nourrir le méthaniseur, donc notre sol peut perdre en énergie si on ne fait pas « gaffe » ? ». Pour approfondir ce sujet, se référer à l'article de Sadte-Bourgeteau et al (2020), où les auteurs mentionnent que « Après épandage, le devenir de la matière organique présente dans les digestats est fortement dépendant du contexte pédoclimatique et de la diversité des organismes présents dans le sol. Faute d'études approfondies, l'impact des digestats sur la composante biologique du sol reste toutefois largement méconnu et il n'est pas possible aujourd'hui de statuer sur l'adéquation entre cette pratique de valorisation agroéconomique et le maintien, voire la promotion de la diversité de ces organismes et des fonctions et services associés (...). Les auteurs concluent alors à la nécessité d'impulser des travaux de recherche afin de mieux évaluer l'impact de telles pratiques à l'attention des agriculteurs.

Figure 3 : Le cheminement de la matière organique du sol

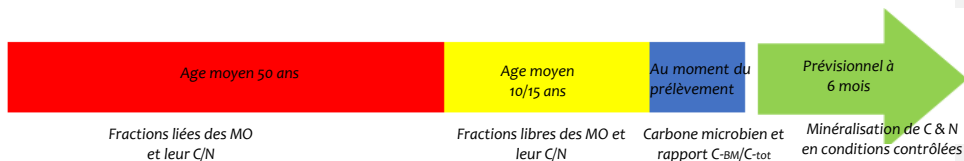


Question-3 : les MO du sol, ça s'analyse ?

La compréhension du volet dynamique des MOS se renforce grâce aux indicateurs analytiques (avec leurs seuils d'interprétations) car sont abordés :

- Les indicateurs quantitatifs et proportions indispensables, basés sur une approche statistique descriptive (Déplanche T. et Salducci X., 2015), pour dimensionner les éventuels besoins en apport organique tout en s'assurant que le sol est suffisamment vivant.
- Le volet qualitatif pour être cohérent face à la demande du sol et à l'efficacité des microorganismes du sol pour s'assurer de leur capacité à se renouveler et bien sûr de rendre des services entre autres celui de la fourniture d'azote.
- Un aspect rarement abordé, à savoir les temps moyens de renouvellement de chacun des stocks organiques.

Les MOS prennent une nouvelle dimension dynamique mais cette fois dans le temps long que l'on peut schématiquement illustrer par une frise temporelle qui se place facilement dans le temps de l'exploitation agricole. Les informations sous la frise temporelle ne sont qu'un rappel des analyses réalisées pour chaque compartiment : les fractions granulométriques de la MO et leur C/N respectifs ; en outre l'Indice de Stabilité de la Matière Organique (ISMO) est mesuré. Les acquis récents sur la MO montrent que le temps de résidence d'une MO est plus lié à sa localisation et à son accessibilité qu'à sa nature chimique (Lehman et al, 2015) ; en conséquence le ratio C/N ne semble pas suffisamment fiable pour estimer le temps de résidence des MO dans leurs compartiments.



Question-4 : MO du sol, comment ça se pilote ?

Le volet pragmatique apparaît avec cette dernière question sur le pilotage des MOS mais cette fois de manière plus évidente ou plus ciblée puisque l'ensemble des compartiments organiques du sol et leurs fonctions sont désormais mieux connus. Puisque « *La terre est l'estomac des plantes, qui en reçoivent la nourriture sous forme prête à la digestion...* » et qu'on dispose d'indicateurs considérés actuellement comme très pertinents pour piloter la fertilité biologique des sols agricoles, on peut donc adapter « la ration alimentaire » des sols pour les maintenir vivants et efficaces pour les besoins.

- Le compartiment MO-libre (jaune) est déficitaire, pourquoi et que peut-on proposer ? : la matière végétale carbonée n'est plus fournie au sol depuis un certain temps : *je privilégie les apports carbonés, jeunes, énergétiques (paille, fumier pailleux).*
- Le compartiment MO-liée (rouge) est déficitaire, pourquoi et que peut-on proposer ? : mon sol est ou a été trop travaillé (labour systématique sur au moins une génération, culture industrielle...), et/ou sol à texture grossière, *je choisis des apports de MO stable : compost stable (déchets verts compostés, fumier bovin pailleux composté...)*
- Le compartiment vivant (bleu) est trop petit avec une faible capacité à se renouveler, pourquoi et quelle stratégie mettre en place ? Mon sol est insuffisamment nourri, l'état physico-chimique est peu compatible avec la vie du sol : *je contrôle les compartiments physiques et chimique (pH), je nourris mon sol (fumier, engrais verts).*
- Les services rendus (vert) par le compartiment vivant ne donnent pas satisfaction, pourquoi et quelle stratégie ? Les MOS ne sont pas suffisamment riches en azote, mon sol a été fertilisé trop longtemps avec des produits peu digérables ... *je privilégie les MO riches en azote (légumineuse, fiente, lisier...).*

Encadré n°1 : Brève histoire de Celesta-lab et de l'analyse biologique des sols (Xavier Salducci)

La société Celesta-lab, initialement Alma Terra, a été créée en 1996 par X. Salducci. Fort de son bagage universitaire (Docteur en écologie microbienne des sols de l'Université Lyon I), et après une première mission dans la bactériation de semence, X. Salducci a eu pour projet de fonder un laboratoire d'analyse orienté vers l'étude et la caractérisation du fonctionnement biologique et organique des sols. L'idée était de développer et proposer aux agriculteurs et conseillers agricoles des indicateurs du fonctionnement organique et biologique des sols qui viennent compléter l'offre traditionnelle portant sur le potentiel physique et chimique des sols.

A cette époque, l'agriculture biologique devenait un sujet politique et les premières aides sous formes de Mesures Agri-Environnementales (MAE) prenaient naissance (<https://www.strategie.gouv.fr/sites/strategie.gouv.fr/files/archives/rapport-INRA-pour-CGSP-VOLUME-1-webo7102013.pdf>), tandis que le recyclage des matières organiques urbaines et issues de l'industrie agro-alimentaires initié en 1992 (https://record-net.org/storage/etudes/02-0807-1A/rapport/Rapport_record02-0807-1A.pdf) prenait de l'ampleur. Ce contexte amenait des interrogations sur la fertilité biologique des sols et l'intérêt des matières organiques recyclées sur le fonctionnement organique du sol. Au cours de son cursus et lors du projet de création d'entreprise, le créateur de Celesta-lab s'était intéressé aux recherches de Rémi Chaussod et de Bernard Nicolardot de l'INRA de Dijon, sur la mesure de la biomasse microbienne et de ses activités de minéralisation du carbone et de l'azote (Chaussod R., B. Nicolardot, G. Catroux et J. Chrétien, 1986 ; Catroux, G., Chaussod R. et Nicolardot B., 1987). Il a découvert également, et échangé avec Christian Feller (IRD) et Jérôme Balesdent (INRA Versailles) sur l'intérêt des techniques de fractionnement de la matière organique du sol (Feller C., 1979 ; Balesdent J., Pétraud J. et Feller, C. 1991). Ces échanges ont débouché sur une offre analytique dès 1996 ayant pour objectif de qualifier et quantifier quatre grands pools de matières organiques du sol ayant des fonctions différentes. Cette analyse du fonctionnement organique et biologique du sol était basée sur des protocoles standardisés issus des laboratoires de Recherche de l'INRA et de l'IRD. Plus tard, ces méthodes d'analyses furent en partie normalisées (NF X31-516 : fractionnement granulodensimétrique des matières organiques particulières du sol dans l'eau ; ISO 14240-2, 1997 : dosage de la biomasse microbienne par fumigation / extraction ; NF EN ISO 16072-2011 : Détermination de la respiration microbienne).

De 1996 à 2012, ces techniques d'analyses ont été proposées dans le cadre d'étude et d'expérimentation à l'échelle nationale, que ce soit en viticulture, grandes cultures, arboriculture et maraîchage, et utilisées essentiellement dans le cadre de comparaison de différentes pratiques d'entretien des sols sur le stockage de la matière organique et le fonctionnement biologique du sol. Une première présentation de la méthodologie a été faite au congrès du GEMAS-COMIFER en 2007 (Salducci, 2007).

Depuis, des programmes nationaux d'envergure ont reconnu la qualité des indicateurs sélectionnés comme le programme bioindicateurs de qualité des sols de l'Ademe (Bispo, 2008) ou encore le projet Microbioterre (2022).

Au-delà des indicateurs, disposer d'un référentiel de comparaison est indispensable pour pouvoir interpréter correctement les valeurs. En 2012, une première synthèse de l'ensemble des données, ayant pour objectif de déterminer des seuils pour chaque système de culture a été faite dans le cadre d'un stage de fin d'étude d'Ingénieur (Déplanche T., 2012). Elle a porté sur un lot de 10 000 analyses et 15 indicateurs. Elle a permis de mettre en place les bases d'un référentiel pour les indicateurs étudiés pour chaque système de culture et définir des valeurs seuils statistiques pour chacun des indicateurs, permettant le positionnement d'échantillons dans notre référentiel. La démarche a fait l'objet d'un poster au congrès du GEMAS-COMIFER de 2015 (Déplanche et Salducci, 2015).

Par la suite cette approche a été améliorée en intégrant la texture des sols pour apporter plus de finesse au positionnement et à continuer de croître. Une nouvelle présentation au COMIFER-GEMAS a été faite en 2019 (Déplanche et Salducci, 2019).

A ce jour plus de 75 000 échantillons ont été reçus au laboratoire, et si l'on se focalise par exemple uniquement sur les grandes cultures, une sélection drastique de 6000 lignes constitue le référentiel permettant de comparer les nouveaux échantillons à une base « absolue ».

Au-delà des chiffres dans un référentiel, l'attente de l'agriculteur est surtout un programme d'action à entreprendre pour corriger ou améliorer la fertilité de son sol. Une équipe d'agronomes se charge donc de rendre compréhensible les analyses en les traduisant dans des propositions d'actions concrètes sous formes de conseils personnalisés écrits et téléphoniques.

Références (ordre chronologique)

- Balesdent J., Pétraud J. et Feller, C. 1991. Effets des ultra-sons sur la distribution granulométrique des matières organiques des sols – Science du Sol, 29(2) : 95-106
- Catroux, G., Chaussod R. et Nicolardot B. 1987. Appréciation de la fourniture d'azote par le sol – C.R. Acad. Agric. Fr. – 73(3) : 71-79
- Chaussod R., B. Nicolardot, G. Catroux et J. Chrétien. 1986 - Relations entre les caractéristiques physico-chimiques et microbiologiques de quelques sols cultivés. Science du Sol – 2 : 213-226
- Chaussod R. 1996. La qualité biologique des sols : Évaluation et implications. – Etude et gestion des sols, vol 3, pages 261-278
- Déplanche T. et Salducci X. 2015. Indicateurs biologiques en grandes—Etude et gestion des sols, vol 3 cultures : un premier référentiel de laboratoire. 12^{ème} Rencontre Comifer-Gémas.
- Déplanche T. et Salducci X. 2019. 25 ans d'analyses biologiques de sol... et une méthode d'interprétation. 15^{ème} Rencontre Comifer-Gémas.
- Feller C. 1979. Une méthode de fractionnement granulométrique de la matière organique des sols. Application aux sols tropicaux, à texture grossières, très pauvre en humus. Cahier ORSTOM, série Pédologie, XVII(N°4), 339-346)
- Salducci X. 2007. Qualité des matières organiques des sols : une nouvelle génération d'analyses de routine. 8^{ème} Rencontre Comifer-Gémas. 9p.
- Bispo A., Grand C. et Galsomies L., 2008. Le programme ademe “bioindicateurs de qualité des sols” : vers le développement et la validation d'indicateurs biologiques pour la protection des sols - Ademe
- Riah-Anglet W., Nadia Laurent N., Cusset E., Tscheiller R., 2022 Projet Microbioterre - Analyse

Le recueil de plusieurs témoignages : vigneron, agriculteur, éleveur, agronome

Guillaume CHEDRU, céréalier à Goderville (76)

“Avec mon père Antoine Chedru, nous sommes agriculteurs en Seine Maritime à Goderville. L'exploitation est en polyculture (Blé, Colza, Féverole, Lin textile, betterave) en agriculture de conservation depuis 30 ans.

Nous avons connu les analyses Celesta'lab suite à une formation avec Xavier Salducci en 2015. La première analyse était prometteuse avec un taux de MO total à 2.27 et une biomasse microbienne à 391 mg/kg. Ce qui dans nos types de sol limoneux battant est très satisfaisant.

Dans ces années nous avons déjà réduit le travail du sol pour limiter la perte par minéralisation, les cultures d'automne étaient en Semis Direct strict et les cultures de printemps avec un travail peu profond, max 5cm. Les couverts étaient déjà riches avec des résultats allant jusqu'à 7 t/ms dont beaucoup de légumineuses. Des compost et fumier revenaient sur les parcelles tous les 6 ans, les pailles broyées et restituées... Il fallait donc rechercher une nouvelle méthode pour continuer d'équilibrer nos sols.

Suite à une formation avec MSV (maraîchage sur sol vivant) nous avons connu le BRF (bois raméal fragmenté) et commencé la pratique sur l'exploitation. L'objectif était que tous les ans 30ha de la ferme reçoivent 10T de BRF. Aujourd'hui en 2023, toutes les parcelles en ont reçu et on commence le 2^{ème} tour de la rotation.

En 2020 suite à une nouvelle rencontre avec X. Salducci, il nous apprend que le BRF est constitué majoritairement de cellulose et très peu de lignine ce qui permet d'augmenter la MO libre. Nous avons donc réalisé une nouvelle analyse sur la même parcelle que 2015. La MO libre était devenue plus élevée et l'équilibre MO stable/libre à l'optimum. Le taux de MO total a augmenté en 5 ans de 0.3 pour atteindre 2.6. Sur notre exploitation, on considère le sol comme premier pilier pour réussir notre système de semis direct, réduction d'intrant. Si celui-ci ne fonctionne pas correctement, nos pratiques ne seront pas viables sur le long terme et la sécurité de l'exploitation sera fébrile. Toujours en recherche d'amélioration, nous testons de nombreuses méthodes sur nos sols. Les analyses Celesta-lab sont un moyen scientifique de mesurer l'impact de ces pratiques et de vérifier que nous ne faisons pas d'erreur. Nous utilisons également ces analyses lors de reprise de terre que nous ne connaissons pas pour actionner les bons leviers afin de positionner les sols au maximum de leur fonctionnement biologique.”

Boris CHAMPY, Vignerons, Nantoux, Bourgogne (21)

« Je travaille depuis 2013 avec Christian Barnéoud et le Laboratoire Celesta-lab. L'approche couplée du profil de sol (pour observer le fonctionnement du sol, le développement du système racinaire, le tassement éventuel ou la magnifique structure, la présence de vers de terre...) et de l'analyse physique, chimique et biologique par Celesta-lab permet d'aller vers ce que j'appelle une fertilisation biologique du sol. Les analyses fines de la matière organique donnent des indications précises sur ce qui va être disponible pour la vigne sur le court terme (azote restituée) et aussi de réfléchir sur le plus long terme. Avant, avec seulement le % de MO, il n'était pas possible de comprendre pourquoi avec 2.2% dans certains cas ça allait, et d'autres cas pas du tout.

Ce que j'appelle la fertilisation biologique, c'est de faire fonctionner le sol pour que la culture profite au maximum sans situation de stress ou d'excès (nutrition minérale et hydrique). L'approche fine de Celesta (C/N, MO fine et grossière, Carbone d'origine microbienne...) permet de raisonner des itinéraires adaptés à chaque situation : soit un apport de fumier, soit une restitution des bois de taille, soit un amendement ou engrais organique. Au fil des ans, j'ai pu mettre en place des itinéraires où le sol est de plus en plus vivant, c'est-à-dire qu'il a une « belle » fertilité. Les analyses ont montré que souvent, il faut des engrais verts, que j'ai pu intégrer avant plantation (pendant le « repos » du sol) et aussi progressivement sur vigne en place, technique maintenant bien maîtrisée. »

Sébastien et Marc PICAUD, éleveurs filière Comté et céréaliers, St Lothain (39)

« Avec mon frère Marc, nous avons repris la ferme paternelle et fondé le GAEC de Silèze à St Lothain dans le Jura. C'est une exploitation de 250 hectares, dont 90 en prairie naturelle, car nous avons un troupeau de vaches laitières en filière comté. Pour nos animaux, nous avons fait le choix de l'aire paillée intégrale et notre fumier est épandue sur les têtes de rotation, à savoir le tournesol, le maïs grain ou le colza, les autres cultures sont le blé, l'orge d'hiver, de printemps et le soja. Nous faisons des analyses de sol régulièrement avec la coopérative agricole surtout pour le volet chimique, les oligo-éléments et le dosage de la matière organique. Les parcelles ainsi analysées étaient par ailleurs contrôlées régulièrement : la matière organique était plutôt stable, ce qui nous rassurait quant à nos pratiques de fertilisation et de gestion de nos fumiers (entre 15 et 25 tonnes/ha selon les cultures). En 2016, lors d'une formation sur les sols et les indicateurs analytiques de la fertilité des sols, Christian Barnéoud, agro-pédologue à la Chambre d'agriculture, nous a parlé d'indicateurs qui pourraient nous permettre de mieux comprendre le fonctionnement biologique de nos sols ... et nous avons testé sur deux parcelles. On a alors compris qu'un taux unique de matière organique n'était pas toujours suffisant, qu'une teneur jugée normale de la matière organique totale n'était pas systématiquement synonyme d'une bonne activité microbienne et qu'il fallait nourrir nos sols avec de la matière énergétique ... un peu comme nos vaches ! Ces analyses, que nous faisons maintenant sur d'autres parcelles, nous permettent de mieux comprendre leur fonctionnement et d'adapter les leviers à mettre en œuvre : par exemple, une parcelle est correcte du point de vue des MO mais le pH est trop bas et le sol est jugé peu vivant... on a corrigé le pH et on contrôlera si la vie redémarre. Dans une autre, c'est la fraction libre qui fait vraiment défaut ... on sait qu'on doit laisser plus de pailles, apporter un peu plus de fumier. En complément de ces analyses, on contrôle la qualité physique de nos sols en faisant régulièrement les profils de sol au chargeur frontal. Christian nous sollicite depuis 3 ans plus régulièrement pour faire des profils de sol dans des formations qu'il anime chaque année pour des techniciens de chambres d'agriculture. Je dirai pour terminer qu'en 2022 en particulier, la très forte augmentation du prix des engrais que nous avons subi, nous a permis d'envisager sereinement des impasses en fertilisants au regard de la bonne santé de la plupart de nos sols et de leur activité biologique telle que mesurée par le laboratoire d'analyse. »

Matthieu LOOS, TERRES INOVIA, Domaine du Chaumoy, Le Sudray (18)

« Aujourd'hui, la caractérisation de la fertilité biologique des sols devient incontournable si l'on souhaite orienter les agriculteurs vers de nouvelles pratiques permettant de rendre leurs sols plus fonctionnels. Après avoir réalisé en tant qu'ancien conseiller Chambre d'Agriculture des formations sur les MO du sol et sur l'observation des sols, j'ai accompagné un certain nombre de groupes d'agriculteurs dont l'objectif principal était de sécuriser leur transition vers la réduction, voire la suppression du travail du sol. Il m'a paru évident d'utiliser les analyses de fractionnement de MO et de fonctionnement biologique des sols avec les agriculteurs : les indicateurs nous ont permis de faire un état des lieux des compartiments organiques et biologiques des sols afin de pouvoir accompagner les choix d'évolutions de pratiques. Si le fractionnement de la MO et sa qualité restent des indicateurs peu variables sur le court terme, ils permettent d'obtenir une « photographie » du sol pour faire un lien avec les pratiques du passé, et de préparer les pratiques à venir. Le compartiment vivant et plus particulièrement les potentiels de minéralisation sont des indicateurs qui peuvent réagir plus rapidement aux changements de pratiques, et donc mesurables à des pas de temps plus courts et plus fréquents pour juger de l'impact des pratiques sur la fertilité biologique du sol. Bien entendu, tous ces indicateurs prennent encore plus leur sens lorsqu'ils sont couplés à l'observation de la structure du sol, pour ne pas passer à côté de certaines explications du diagnostic biologique. Une bonne structure de sol reste un préalable indispensable à l'amélioration du fonctionnement biologique du sol. L'utilisation de ces indicateurs m'a donc permis de mieux cerner le fonctionnement organique d'un sol : il ne s'agit plus seulement d'avoir un sol avec une bonne teneur en MO, mais de faire en sorte que celle-ci soit la plus fonctionnelle possible, et qu'elle permette de répondre à différents objectifs (amélioration de la structure du sol, minéralisation d'éléments minéraux...). Aujourd'hui aux manettes d'une plateforme système de cultures SYPPRE en partenariat avec Arvalis, le bon fonctionnement organique et biologique des sols argilo-calcaire du Berry passe par la mise en place de pratiques en lien avec la connaissance des indicateurs biologiques. Dans un contexte de changement climatique et de stockage du carbone, la compréhension de ces indicateurs me permet d'avoir un discours plus pragmatique et objectif, lorsque je suis sur le terrain avec des agriculteurs en tant qu'agronome au sein d'un institut technique. Toujours au contact fréquent des agriculteurs notamment sur les questions qui tournent autour de l'implantation et la robustesse des cultures au sein de Terres Inovia, j'ai à cœur de pouvoir continuer à échanger sur les pratiques concrètes permettant à court et moyen terme d'améliorer la résilience du sol face au changement climatique, et maximiser l'atteinte du potentiel des cultures, grâce aux indicateurs agronomiques et biologiques du sol. »

Conclusion

En agronomie, que ce soit en culture annuelle ou pérenne, disposer d'indicateurs normalisés, suffisamment pertinents, accessibles au plus grand nombre et à la fois acceptables financièrement apparaît une nécessité pour accompagner les agriculteur.ice.s dans leur gestion du compartiment complexe des matières organiques de leur sol. Certes cela nécessite un minimum d'appropriation de ces concepts, la conscience que les MOS sont bien un des piliers de la fertilité des sols agricoles. C'est à mon sens un des rôles importants pour ne pas dire majeurs de toutes les structures agricoles (chambres d'agriculture, instituts techniques, coopératives agricoles, structures de formation...etc.) qui affichent leur volonté d'accompagner techniquement le monde paysan notamment face au dérèglement climatique. C'est aussi et peut-être même surtout, un des rôles cruciaux des structures d'enseignement agricole : permettre aux jeunes apprenant.es de

comprendre les concepts dynamiques des MOS pour en percevoir l'importance majeure et la nécessité de leur gestion au sein de l'exploitation agricole est aussi une manière d'appréhender le dérèglement climatique de manière active. A cet égard, je ne peux que saluer le programme actuel « PromoSolsEduc » piloté par l'Association Française pour l'Etude des Sols qui « vise le recensement et la valorisation de ressources et séquences pédagogiques en lien avec la connaissance et la préservation des sols » en proposant « aux enseignants des approches “problématisantes” de la ressource sol mettant en avant les menaces qui pèsent aujourd'hui sur cette ressource et les solutions qui existent pour atténuer ces menaces ».

Références bibliographiques

Boulaine J.,1989. Histoire des pédologues et de la science des sols. Ed.INRAe ,285 p.

Chaussod, R. et Nouaïm, R.,2019. « Qualité biologique » des sols cultivés : évolution des concepts et des outils de diagnostic. In : 14èmes Rencontres de la Fertilisation Raisonnée et de l'Analyse, Dijon, 20-21/11/2019. [https:// gemas.asso.fr](https://gemas.asso.fr)

Kockmann, F., Fabre, B., Chaussod, R., (1990). Le chaulage en limons battants. *Perspectives Agricoles* n°144,12 pages

Lehmann, J., Kleber, M., 2015. The contentious nature of soil organic matter. *Nature* 528, 60–68. Doi :10.1038/nature16069

Ranjard L. et d'Oiron E. (2018). <https://revue-sesame-inrae.fr/agrinov-enfin-le-sol-sous-surveillance-1/>

Sadet-Bourgeteau S., Maron P-A., et Ranjard L. (2020). Que sait-on de l'impact des digestats de méthanisation sur la qualité biologique des sols agricoles ? *AE&S n°10-1Agronomie et méthanisation*, pp111-114

Valé Matthieu, Bouthier Alain, Chaussod Rémi, Cusset Elodie, Deschamps Thibaud, Houot Sabine, Laurent Nadia, Le Net Justine, Leclerc Blaise, Perrin Anne-Sophie, Recous Sylvie, Riah-Anglet Wassila, Roussel Pierre-Yves, Trinsoutrot-Gattin Isabelle (2019). *Disposer de méthodes abordables, précises et robustes pour les indicateurs de gestion des matières organiques dans les sols cultivés*. Diaporama présenté lors des 14^{ième} Rencontres Comifer-Gemas, 20-21 novembre 2019-Dijon.



Rendre compte des performances de systèmes horticoles diversifiés agro-écologiques : construction d'un cadre générique de restitution des résultats avec et pour les agriculteurs

Aude Alaphilippe*¹, Alexia Lefevre², Solène Borne¹, Josian Delaunay³, Rachel Graindorge², René-Claude Judith⁴, Pierre-Éric Lauri⁵, Jean-Michel Ricard⁶, Sylvaine Simon¹, Luc Vanhuffel⁷, Joël Huat⁴

¹ INRAE UERI Gotheron, F-26320 St-Marcel-Lès-Valence ;

² Institut technique ARMEFLHOR, Saint Pierre, La Réunion, France ;

³ EPL Forma Terra, Saint Paul, La Réunion, France ;

⁴ CIRAD, UPR HORTSYS, F-97455 Saint Pierre, La Réunion, France ;

⁵ INRAE, UMR ABSys, Montpellier ;

⁶ CTIFL, Centre de Balandran, 751 chemin de Balandran – F-30127 Bellegarde ;

⁷ Chambre d'Agriculture de La Réunion, Saint Pierre, La Réunion, France.

Email contact auteurs : aude.alaphilippe@inrae.fr

Résumé

Dans le cadre du plan gouvernemental de réduction de l'usage des pesticides, deux projets, Ecophyto DEPHY EXPE ALTO (France métropolitaine) et STOP (Ile de La Réunion), expérimentent des systèmes horticoles diversifiés dans l'objectif de produire sans pesticides de synthèse, en s'appuyant sur la biodiversité.

Les performances des systèmes diversifiés sont plurielles et aucune méthode n'est disponible pour évaluer ces types de systèmes horticoles. Une démarche participative impliquant différents acteurs de la filière a permis la construction d'un cadre de restitution des résultats sous forme de "feuillet résultats" accessibles et appropriables par les agriculteurs. Ce cadre tient compte des spécificités de ces systèmes diversifiés agroécologiques en proposant une représentation des performances des systèmes diversifiés dans leur complexité, en regard de leur contexte, de l'occupation des espaces et de leur variabilité temporelle. Ce travail se poursuit pour intégrer d'autres volets à l'évaluation dont le pilotage de ces systèmes diversifiés.

Mots clés : systèmes horticoles diversifiés, performance, cadre de restitution, partage des résultats

Summary

In the frame of the French national action plan to reduce pesticide use, two projects DEPHY EXPE ALTO, in French metropolitan area and STOP, in La Reunion Island, are carrying out field experiments of horticultural diversified systems, without synthetic pesticide use, but functional biodiversity.

The performances of such diversified systems are diverse, and appropriate methods are needed to evaluate them. A participatory approach has been developed to build a framework to share results and performances with farmers. This framework considers the specificity of such diversified systems, including their land occupation and evolution in time, as well as their pedoclimatic and economic context. Work on both projects helped gain genericity for this framework, which is a single leaflet with a short description of the system with context elements, presenting agronomic and economic results. This study will continue to include other dimensions among which social one in order to best meet the needs and expectations of growers.

Introduction

L'intensification de l'agriculture s'est accompagnée d'une utilisation généralisée et parfois importante des pesticides de synthèse entraînant la contamination des différents compartiments de l'environnement par ces substances (De Bon et al., 2014). A l'heure actuelle, plusieurs projets, dont les projets Ecophyto DEPHY EXPE SToP⁶⁶ et ALTO⁶⁷, développent des approches d'expérimentation système (Havard et al., 2017) dans lesquelles des systèmes de culture très diversifiés, n'utilisant pas de pesticides de synthèse (voire sans aucun pesticide), sont expérimentés dans l'objectif de produire en s'appuyant sur la biodiversité cultivée et sauvage (Graindorge et al., 2022 ; Penvern et al., 2018 ; Simon et al., 2019 ; Ricard et al., 2022). Ces systèmes sont complexes, et leurs performances sont plurielles. Cependant, aucune méthode n'est actuellement disponible pour évaluer ces systèmes horticoles diversifiés. L'évaluation multicritère permet l'évaluation d'un ou plusieurs systèmes sur la base de plusieurs critères déterminés en fonction des objectifs assignés à ces systèmes et qui intègrent également différents points de vue et dimensions (Lairez et al. 2015). Il convenait donc de développer une méthode d'évaluation répondant aux particularités de ces systèmes diversifiés et en accord avec les objectifs et finalités de production agroécologique de ces deux projets utilisés comme cas d'étude.

Le développement d'une nouvelle méthode nécessite toutefois certains points d'attention et une démarche rigoureuse afin de proposer une analyse de qualité. Selon Lairez et al. (2015), il est essentiel d'être transparent sur les choix méthodologiques et de valider la méthode en évaluant sa pertinence, sa cohérence, sa sensibilité ainsi que sa robustesse. Une méthode participative peut être mise en place pour tenter de concilier les points de vue des différents acteurs impliqués dans la construction de la méthode sur les éléments à considérer. Bien que cette approche nécessite des temps d'échange et de débats pouvant s'avérer chronophages (Lairez et al., 2015), c'est elle que nous avons décidé de mobiliser pour construire un cadre de restitution des résultats avec et pour les agriculteurs. Ce cadre se veut générique et il vise à proposer une méthode d'évaluation multicritère cohérente, pertinente au regard des objectifs des dispositifs SToP et ALTO et tenant compte des attentes des agriculteurs, notamment pour les volets agronomique et économique. Par ailleurs, afin de permettre aux acteurs de terrain de s'appuyer efficacement sur des résultats parfois complexes issus d'évaluation, il convient de rendre ceux-ci accessibles et de permettre aux agriculteurs d'interagir entre eux autour de ces résultats, favorisant ainsi la transition agroécologique (Guérin et al., 2018 ; Deguine et al. 2023). Ainsi, ce travail porte à la fois sur le fond (éléments à considérer dans l'évaluation, manière de les évaluer) et sur la forme (formats de partage des résultats).

Après une description des dispositifs SToP et ALTO ayant servi de cas d'étude, la démarche de construction du cadre de restitution des résultats sera décrite. Les résultats se présentent sous forme de "feuilles résultats", dont la structure et les modalités de représentation choisies (format, éventuelles références...) sont détaillées. Enfin, les spécificités liées aux systèmes horticoles diversifiés et les questions soulevées quant à la représentation des résultats seront discutées.

Matériels et méthodes

Projets et sites

Pour répondre à l'objectif de suppression de l'usage de produits phytosanitaires de synthèse, deux initiatives reposant sur la diversification des cultures ont été développées dans le cadre du dispositif Ecophyto DEPHY EXPE (<https://ecophytopic.fr/dephy/le-dispositif-dephy-expe>) : le projet SToP, en outre-mer, et le projet ALTO, en métropole, dont les principales caractéristiques sont résumées dans le tableau 1.

⁶⁶ <https://ecophytopic.fr/dephy/conception-de-systeme-de-culture/projet-stop>

⁶⁷ <https://ecophytopic.fr/dephy/concevoir-son-systeme/projet-alto>

Tableau 1. Description générale des projets SToP et ALTO.

Caractéristiques du projet	SToP	ALTO
Zone géographique	Tropicale (La Réunion)	Méditerranéenne (Métropole)
Productions	Maraîchage et arboriculture fruitière	Arboriculture fruitière
Type de diversification (niveau, type, formes)	Juxtaposition de micro-parcelles homogènes	Alternance d'espèces et de variétés entre rangs et sur les rangs et multistrate
Problématique de ces systèmes	En quoi la diversification permet-elle d'obtenir une production commercialisable et viable économiquement sans pesticides de synthèse ?	Dans quelle mesure peut-on produire des fruits sans pesticides en s'appuyant sur les services écosystémiques, notamment de régulation ?
Partenaires	ARMEFLHOR, CIRAD, EPLEFPA Forma'Terra, Chambre d'agriculture 974, FDGDON	INRAE, Ctifl, lycée agricole EPLEFPA Le Valentin, GRAB, LPO, Iteipmai, Chambre d'Agriculture 26, Agribiodrôme
Méthode de construction des dispositifs expérimentaux	Ateliers de co-conception	
Type de dispositifs	- 3 observatoires pilotés répartis sur la zone géographique - Dispositifs en station expérimentale (organisme de recherche agronomique, institut technique ou lycée agricole)	
Pilotage	Evolutif 'chemin faisant'	
Année de début de projet	2020	2018
Références	Graindorge et al., 2022 https://ecophytopic.fr/dephy/conception-de-systeme-de-culture/projet-stop	Penvern et al., 2018 ; Simon et al., 2019 ; Ricard et al., 2022 https://www6.paca.inrae.fr/ueri/Contrats-et-projets/Expe-DEPHY-Ecophyto-II-ALTO

La diversification des systèmes de production a pour objectif de favoriser la régulation naturelle des bio-agresseurs par l'augmentation de la biodiversité fonctionnelle (les auxiliaires sont favorisés par l'augmentation des ressources alimentaires et des habitats), par la création d'effet barrière, de dilution, par perturbation des cycles des bio-agresseurs. Il s'agit également d'apporter des bénéfices agronomiques via les plantes cultivées. Cette diversification porte donc sur les cultures elles-mêmes, en matière d'espèces et de variétés, mais consiste aussi en l'introduction de plantes de service favorables aux auxiliaires ou défavorables aux ravageurs. Ces systèmes ont des organisations spatiales différentes : ils incluent tous des plantes pérennes, mais sont constitués soit d'une juxtaposition de micro-parcelles homogènes (SToP) soit d'une alternance de plantes de service, d'espèces cultivées et de variétés entre rangs et/ou sur les rangs (ALTO), avec un étagement vertical des espèces.

Pour chacun de ces deux projets, trois dispositifs expérimentaux ont été mis en place (Figure 1). Ces dispositifs, de type observatoire piloté (terminologie ECOPHYTO) adoptent une démarche d'observation de systèmes en rupture et pour lesquels les principes de gestion sont évolutifs. Ils ont été co-conçus avec des agriculteurs, des conseillers agricoles, des formateurs, des chercheurs et des naturalistes dans le cadre d'ateliers.

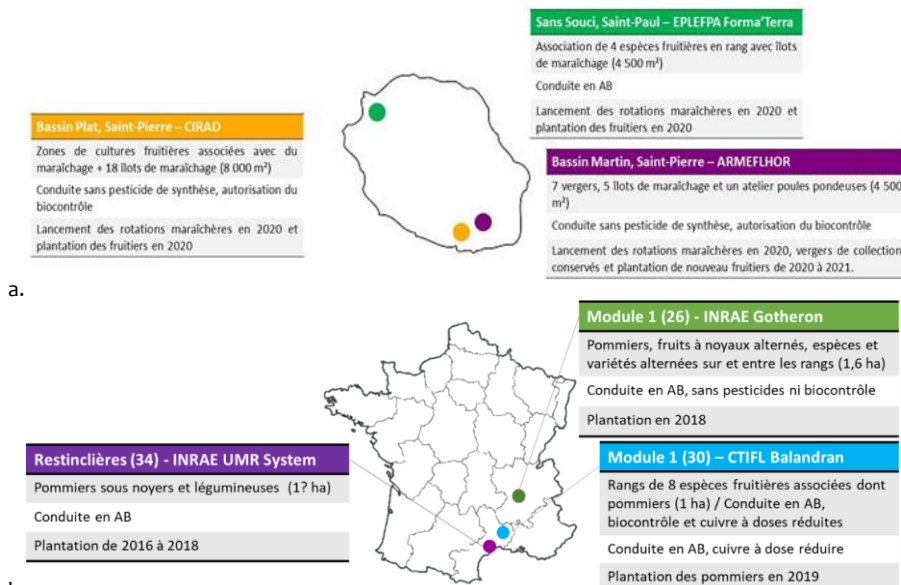


Figure 1. Carte de localisation des dispositifs expérimentaux sur l'île de La Réunion, projet SToP (a) et en métropole, projet ALTO (b).

Démarche d'élaboration d'un cadre de restitution des résultats (de systèmes de culture horticoles diversifiés) avec et pour les agriculteurs

Pour élaborer ce cadre, une démarche en cinq étapes a été développée (Figure 2). Cette démarche repose sur une base experte et bibliographique. Pour les deux projets, les cibles et partenaires ont été associés à la construction de la méthode sur la base de propositions pour le projet SToP, à partir d'une page blanche pour le projet ALTO. Nous avons travaillé en complémentarité sur les deux projets avec une mise en commun à chaque étape.

Les cinq étapes sont les suivantes :

- Etape 1 : Identifier la cible principale pour la restitution des résultats

Pour les deux projets, la cible commune choisie est celle des agriculteurs et leurs accompagnants dont les conseillers agricoles.

- Etape 2 : Expliciter les finalités de l'évaluation propres à chaque dispositif en lien avec les objectifs

Pour le projet SToP, l'objectif à atteindre est de produire des fruits et légumes commercialisables, de quantifier le nombre d'ETP nécessaire pour faire fonctionner ce système et d'estimer sa capacité à générer un revenu minimum pour faire vivre cette main d'œuvre.

Pour le projet ALTO, il s'agit de développer des systèmes renforçant le service de régulation naturelle afin de générer une production de fruits.

- Etape 3 : Définir les composantes de l'évaluation

Pour SToP, les éléments descripteurs de la performance de systèmes diversifiés ont été établis sur une base bibliographique. Pour ALTO, des ateliers multi-acteurs (juin 2021) ont complété ce travail bibliographique sur les volets sociaux et économiques.

Sur cette base, en lien avec les cibles identifiées et les objectifs expérimentaux, un cadre partagé de restitution des résultats a été co-construit pour les deux projets SToP et ALTO.

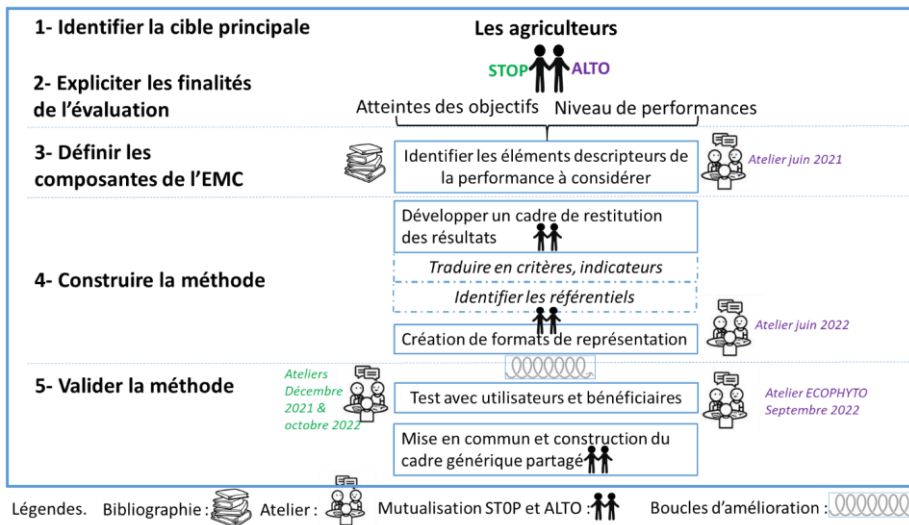


Figure 2. Démarche d'élaboration d'un cadre de restitution des résultats : étapes et méthodes mobilisées pour les projets SToP (côté gauche) et ALTO (côté droit). EMC : Evaluation multicritère.

- Etape 4 : Construire la méthode incluant critères, indicateurs et formats de représentation

Deux démarches complémentaires ont été mises en œuvre dans les deux projets. Pour le projet SToP, les porteurs de projet et pilotes de sites ont élaboré une proposition 'à dire d'experts'. Celle-ci a été ensuite confrontée aux critiques des agriculteurs en atelier. Le premier atelier (décembre 2021) a pointé la difficulté d'illustrer les résultats de production (Figure 2). Ainsi, sur le projet ALTO, un atelier a été organisé (juin 2022) pour faire des propositions à partir d'une page blanche pour rendre compte spécifiquement des performances agronomiques (éléments à considérer et formats de restitution).

- Etape 5 : Valider la méthode de restitution et le format de représentation

L'objectif de cette étape est de tester la méthode et de la mettre en application sur les dispositifs. Cette proposition finale a été partagée avec les utilisateurs et bénéficiaires (dont financeurs), afin de recueillir les avis sur le fond et la forme via un test en atelier pour le projet SToP (octobre 2022), et une présentation avec retours critiques pour le projet ALTO (septembre 2022). Enfin, un cadre commun et un canevas support ont été fournis aux porteurs de site expérimentaux pour être utilisés en routine (fréquence annuelle pour SToP et pluriannuelle pour ALTO).

Détail de l'étape 4 pour le projet SToP

L'atelier mené avec les agriculteurs dans le cadre du projet SToP en décembre 2021 visait à identifier les éléments à conserver, à faire évoluer, manquants ou à supprimer sur le fond et la forme du Feuillelet Résultats. Un travail en sous-groupes a été effectué lors de cet atelier. Certains groupes devaient se concentrer en particulier sur le fond du feuillet (éléments manquants, pas intéressants, rubriques manquantes, recommandations), d'autres uniquement sur le format général des feuillets (format feuillet A4 recto verso, lisibilité, facilité de prise en main, de lecture...), et enfin d'autres groupes discutaient de la forme des rubriques (surtout les graphiques, le style, la clarté et l'intérêt du texte).

Globalement, sur la forme générale des feuillets, les participants à l'atelier n'ont pas fait de remarques particulières et ont apprécié la lisibilité et la structure générale. Sur le fond, les participants ont souhaité disposer d'un certain nombre de détails techniques sur la conduite des cultures (IFT, méthodes de protection utilisées, production commercialisable vs. pertes, bioagresseurs observés), les postes de dépenses, les temps de travaux... Les graphiques décrivant la biodiversité n'ont pas été jugés prioritaires. Ainsi, il a été proposé de privilégier un feuillet portant sur la conduite des cultures et les résultats techniques et économiques du système. Les feuillets ont été retravaillés à l'issue de cet atelier et soumis de nouveau aux agriculteurs lors d'un second atelier en octobre 2022 pour finalisation.

Résultats

Présentation du cadre commun de restitution des résultats

Le cadre de restitution se présente sous forme d'un livret format A5 de quatre pages (A4 plié en deux). Il se compose de trois volets :

- La description des dispositifs et systèmes en page 1,
- Les résultats obtenus en lien avec les objectifs du projet sur la double page centrale pages 2 et 3,
- Les moyens mis en œuvre pour réduire ou supprimer l'utilisation des pesticides en page 4.

Nous avons réalisé les feuillets résultats pour les 3 dispositifs SToP et sur un dispositif ALTO. Nous illustrons ici le contenu de ces trois volets avec la feuillelet résultat du site de l'ARMEFLHOR, projet SToP.

Description du dispositif



Cette première page (Figure 3) est structurée en trois parties. La première partie donne des **éléments de contexte** (sol, pente, conditions climatiques, pression sanitaire, éléments marquants). Ces éléments permettent de situer les résultats et participent à l'explication des résultats de production présentés ensuite. Le **dispositif est ensuite présenté** avec son plan et un graphique indique les **surfaces dédiées** aux productions pérennes et annuelles, ainsi que les zones dites support à la production (zones de circulation, infrastructures agroécologiques (IAE)...). Enfin, la description de la diversité avec le nombre d'espèces et variétés productives et non productives est indiquée.

Figure 3. Contexte de l'expérimentation et description du dispositif (Page 1 du feuillet résultats, projet SToP).

Résultats agronomiques

Les résultats de production sont présentés à l'échelle du système (Figure 4). A la demande des producteurs, des **tableaux détaillés par type de culture**, pérenne ou annuelle, principale ou secondaire ont été proposés. Pour chaque espèce, sont donnés : durée du cycle/année de plantation, densité de plantation et nombre d'arbres, production commercialisable, rendement, pertes (légumes ou fruits non valorisés). Pour le maraichage, les performances sont données pour chaque culture de la rotation. A noter que pour les cultures pérennes, dans le projet ALTO, une moyenne glissante des productions et pertes sur 3 ans est envisagée.

Figure 4. Résultats agronomiques (Pages centrales du feuillet résultats, projet SToP).

	Cultures maraîchères									
	Rotation 1 — 96,8 m ²			Rotation 2 — 86,4 m ²		Rotation 3 — 68,2 m ²		Rotation 4 — 65,6 m ²		
	Laitues	Haricots verts	Aubergines associées	Pastèques	Choux	Haricots verts	Oignons	Brèdes	Pommes de terre	Maïs associé
Durée cycle	mars à mai	mai à juillet	Septembre à avril	mars à mai	juin à septembre	mars à mai	juin à novembre	mars à mai	juin à septembre	septembre à janvier
Production commercialisable	1110 p.	126 kg	739 kg	Culture arrachée	401 kg	82 kg	Utilisé en bulbilles	1184 p.	65 kg	239 p.
Déchets	44 p.	14 kg	121,4 kg		31 kg	4 kg		357 p.	23 kg	81 p.
Coûts de production (€)	115	44	197	172	165	64	98	116	33	14
Nombre de traitements biocontrôle	0	2	3	2	6	0	4	1	0	3
Ravageur principal observé	/	Chenilles	Cicadelles Limaces	Pucerons Mouches	Teignes	Thrips Chenilles	Thrips	Limaces Chenilles	Mildiou Fourmis	Chenilles
Stratégie de lutte	/	Biocontrôle	Biocontrôle Association florale	Biocontrôle Auxiliaires	Biocontrôle Filet Auxiliaires	/	Biocontrôle	Biocontrôle	Soliviti	Ecrasage manuel
Marge brute (€)	586	342	1770	-172	342	162	-98	617	27	106

Cultures fruitières

	Manguiers	Letchis
Nombre d'arbres	28	15
Production commercialisable	178	194
Déchets	232	0
Coûts de production (€)	118	0
Nombre de traitements biocontrôle	16	0
Ravageur principal observé	Mouches des fruits	/
Stratégie de lutte	Biocontrôle	/
Marge brute (€)	664	908

Aromates

	Persil	Thym	Basilic
Nombre de bottes	158	611	178
Coûts de production (€)		99	
Marge brute (€)		652	



Les résultats de production des cultures pour cette année 2020 sont très hétérogènes.

Les quantités commercialisables sont globalement peu satisfaisantes pour la plupart des cultures (excepté pour les haricots verts et les aubergines) en étant inférieurs aux références régionales conventionnelles.

Les attaques de bioagresseurs ont été difficiles à maîtriser et les produits employés étaient peu efficaces.

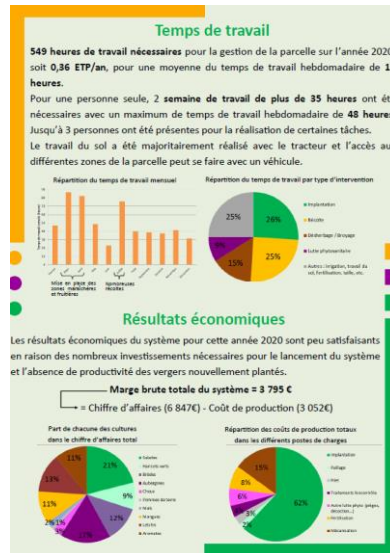
Moyens mis en œuvre

Il s'agit de donner des éléments qui relèvent de la stratégie de protection et de production, incluant les moyens mobilisés dont le temps de travail (Figure 5)

Pour le temps de travail, la **répartition du temps** sur l'année est représentée par type d'activité afin d'identifier d'éventuels pics d'activité. L'histogramme de la répartition du temps de travail par mois, positionné en regard du diagramme circulaire de la répartition **par type d'activités**, permet d'explicitier les principaux pics de travaux.

Pour le projet SToP, une **synthèse des résultats économiques** est produite en lien avec l'objectif du projet de rémunérer la main d'œuvre nécessaire à la gestion du système proposé.

Figure 5. Moyens mis en œuvre et résultats technico-économiques (Page 4 du feuillelet résultats, projet SToP).



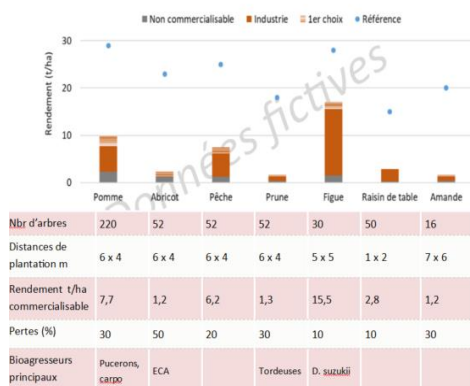
Représentation des résultats agronomiques dans ces systèmes diversifiés et intégration de nouvelles échelles spatiales et temporelles

Pour représenter les résultats agronomiques, un atelier spécifique pour faire des propositions à partir d'une page blanche a été réalisé en métropole en juin 2022 avec le collectif ALTO. En effet, lors de l'atelier SToP dans lequel la proposition élaborée 'à dire d'experts' était discutée, les participants ont pointé la difficulté d'illustrer les résultats de production. Les systèmes agricoles diversifiés agrégeant plusieurs productions de volume et de qualité différentes, il s'agissait de rendre compte à un public cible technique la diversité des productions agricoles générées par ces dispositifs.

A l'issue de cet atelier, deux types de résultats proposés ont fait consensus :

- Une représentation de la productivité combinant représentation graphique avec une valeur de référence (valeur issue de références régionales en Agriculture Biologique (AB) avec la même densité de plantation ; source précisée sur le document) et un tableau détaillant les niveaux de production avec différentes unités, similaire à celui proposé dans SToP (Figure 6).
- Une représentation graphique de l'efficacité du système, sous forme d'histogrammes cumulés, représentant l'ensemble des productions en volume et une simulation des recettes financières (sur la base d'une simulation utilisant les prix de référence AB régionaux du Marché d'Intérêt National (MIN) de Lyon ; source précisée sur le document) au regard des moyens alloués en surface et en temps, faisant ainsi apparaître les productions les plus efficaces.

Productions fruitières principales en 2053—3^{ème} feuille



Commentaires généraux: tendance de production (dynamique).

Difficulté principale. Echec, réussite.

Pour les pommiers, indiquer si variétés intéressantes et d'autres moins.



Efficiences du système

Production et recette au regard des moyens alloués en termes de surface et de temps de travail.

Ce graphique montre différents profils pour les différentes espèces :

- En proportion un faible niveau de production, pour une surface occupée et un temps de travail élevé (abricot, prune)
- En proportion un bon niveau de production pour une surface occupée importante, mais un temps de travail moindre (pomme)
- En proportion un bon niveau de production et un bon prix de vente pour une surface occupée et un temps de travail moindres (figue et des petits fruits).

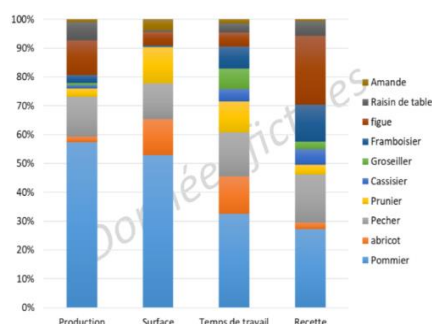


Figure 6. Résultats agronomiques : propositions de pages centrales pour le feuillet résultats sur le site de Gotheron, projet ALTO.

Les éléments du tableau sur les performances agronomiques proposés à l'issue de cet atelier ont alimenté le feuillet résultats de SToP. Le graphique sur l'efficacité est utilisé actuellement uniquement dans le cadre des restitutions de l'un des dispositifs d'ALTO (le site de Gotheron). Une réflexion pour utiliser au mieux ces propositions de représentation est en cours : il s'agit notamment d'intégrer la variabilité interannuelle propre aux cultures pérennes en utilisant des valeurs moyennées sur plusieurs années.

Discussion sur l'intégration des spécificités de systèmes horticoles très diversifiés

Dans ces systèmes, jusqu'à 18 espèces productives se partagent un même espace, espace qui intègre également des surfaces non productives sur le plan agronomique, avec une composition qui évolue au cours du temps.

Pour intégrer les spécificités de ces systèmes, les éléments à considérer et les unités proposées sont :

- **Echelle temporelle** : plusieurs unités (saison, année, cycle pluri-annuel) permettent de représenter la dynamique annuelle et pluriannuelle des différents indicateurs en lien avec les phases de production (plantation, entrée en production...) pour les cultures pérennes, ou en lien avec la succession des cultures lors d'une rotation complète et la saison de production pour les cultures annuelles.
- **Echelle spatiale** : plusieurs unités permettent de rendre compte des rendements, soit à la plante, soit à l'hectare théorique (en extrapolant avec une densité de plantation de référence ou avec prise en compte ou non des passe-pieds qui sont les zones de circulation

entre les planches de culture permanentes en maraîchage). Une proposition de définition de plusieurs types d'espaces est proposée :

La définition du « système de culture » telle que formulée par Sebillote en 1990 doit donc être adaptée à ces systèmes horticoles diversifiés. Il a été proposé de redéfinir l'espace occupé en deux entités :

- **Espace de production**

Il s'agit de la somme des unités de gestion ; une unité de gestion est caractérisée par :

- Une conduite, avec passe-pied associé pour les annuelles ou une densité de plantation pour les pérennes (il peut y avoir une ou plusieurs espèces, une ou plusieurs variétés) ;
- Un espace fixé au sol (une unité spatiale cadastrée) continu (ni morcelée, ni déplacée) ;
- Une temporalité : choix d'un pas de temps pertinent (saison culturale, année, rotation, cycle, phase de production).

- **Espace support de production**

Il s'agit d'espaces nécessaires au bon fonctionnement du système mais dont la fonction première n'est pas de produire : les zones de circulation et les infrastructures agroécologiques, ou encore les zones dédiées contribuant à la fertilité du système par apport de biomasse ou d'azote (légumineuses).

Concrètement, la performance est évaluée en mobilisant la notion d'unité de gestion et plusieurs unités ont été choisies pour exprimer les rendements en ramenant les quantités produites à :

- La surface globale occupée (intégrant les surfaces non productives telles que les chemins et zones de biodiversité) ;
- La surface cultivée totale ;
- La surface théorique équivalente à une référence ayant la même densité de plantation pour permettre la comparaison.

Pour tenir compte de la variabilité temporelle des performances, plusieurs solutions ont été proposées :

- Une évaluation contextualisée des performances en précisant la pression des bioagresseurs et les conditions abiotiques pouvant affecter les rendements ;
- Une évaluation annuelle pour SToP et pluriannuelle pour ALTO en considérant les phases de vie du système (plantation, entrée en production, pleine production ou mûre...).

Enfin, les agriculteurs ne connaissant pas toutes les cultures présentées, il a été proposé de fournir une référence pour chaque culture (si disponible). En particulier, pour ALTO, une référence en agriculture biologique, à densité de plantation identique à celle du rendement théorique par hectare, est fournie.

Conclusions et perspectives

Les systèmes agroécologiques diversifiés sont multi-fonctions, multi-services et évolutifs. Ils sont également 'situés', c'est-à-dire très liés au contexte local. Il y a donc un challenge à la fois pour les construire, les évaluer et enfin les partager, les discuter, dans un contexte où la régulation naturelle des ennemis des cultures est une alternative forte à l'absence d'usage de pesticides (Brevault et Clouvel, 2019).

L'objectif de ce travail en co-conception était que les connaissances issues de dispositifs diversifiés soient accessibles et appropriables par les agriculteurs afin de réduire l'utilisation des pesticides. Cela nécessite que le cadre de représentation soit suffisamment explicite et tienne compte des modes de raisonnement des agriculteurs (Huat et al., 2014) et de leurs perceptions (Vidogbena et al., 2015 ; Rezaei et al., 2019). Ce travail de co-construction d'un cadre de restitution de résultats issus de systèmes complexes a permis de poser les bases d'une démarche. Il tient compte des spécificités de ces systèmes diversifiés agroécologiques en proposant une représentation des performances tenant compte de l'occupation des espaces et de leur variabilité temporelle.

Ce cadre constitue une base de travail originale pour rendre compte des performances de systèmes diversifiés dans leur complexité, en regard de leur contexte, à travers différents indicateurs montrant l'intérêt et les limites de tels systèmes. Il est cependant nécessaire de l'affiner et de le compléter sur d'autres volets, en particulier en lien avec les compétences et le pilotage de ces systèmes. La poursuite de ce travail est prévue dans le cadre du site de Gotheron, dont le dispositif entre en pleine production et sera maintenu jusqu'à 2030 au moins.

Ce travail en co-construction avec deux 'groupes projet' en parallèle a permis d'enrichir la réflexion et de proposer un cadre robuste, adaptable à chaque cas d'étude en fonction des objectifs et des dimensions spatiales et temporelles spécifiques (cultures annuelles et pérennes, systèmes multi-strates). La mise en commun des réflexions issues de ces deux collectifs nous a permis de gagner en généralité.

Ce cadre générique a cependant des limites : les agriculteurs ont des intérêts différents, des contextes d'exploitation spécifiques à chacun, des niveaux de connaissance et d'expérience divers, et leurs besoins d'informations peuvent différer. Aussi, il apparaît nécessaire d'inscrire ces feuillets de résultats dans une évaluation multicritère plus large, couvrant d'autres critères, non prioritaires pour eux à court terme, mais importants à long terme ou pour d'autres acteurs. Ce cadre peut cependant être un support d'interaction, d'échange et de partage d'expériences entre agriculteurs et expérimentateurs (Karki and Bandhari, 2023).

Les choix des producteurs sont guidés par les perceptions qu'ils ont des pratiques alternatives et de leurs impacts sur la façon dont la société les considère (Aubert et Enjolras, 2023). En questionnant la manière de représenter les systèmes complexes, ce travail interroge plus largement le besoin et la manière d'intégrer des angles d'appréciation différents, et l'implication de cette intégration sur les éléments d'évaluation à considérer et les formats de représentation des résultats à proposer.

Remerciements :

Nous remercions l'ensemble les partenaires projets, ainsi que tous les participants aux ateliers et Jean-Marc Barbier pour ses conseils et notes, à Jean-Luc Regnard et Antoine Messéan pour leur relecture enrichissante. Les projets ALTO et SToP sont des projets EXPE DEPHY Ecophyto, action pilotée par le ministère chargé de l'agriculture et le ministère chargé de l'environnement, avec l'appui financier de l'Agence Française pour la Biodiversité, par les crédits issus de la redevance pour pollutions diffuses attribués au financement du plan Ecophyto.

Glossaire

ALTO : Systèmes en Arboriculture et Transition agrOécologique
ARMEFLHOR : Association Réunionnaise pour la Modernisation de l'Economie Fruitière, Légumière et HORTICOLE
CIRAD : Centre de coopération Internationale en Recherche Agronomique pour le Développement
CTIFL : Centre Technique Interprofessionnel des Fruits et des Légumes
EMC : Evaluation MultiCritère
EPLEFPA : Etablissement Public Local d'Enseignement et de Formations Professionnelles Agricoles
FDGDON : Fédération Départementale des Groupements de Défense contre les Organismes Nuisibles
GRAB : Groupe de Recherche en Agriculture Biologique
INRAE : Institut National de Recherche pour l'Agriculture, l'alimentation et l'Environnement
LPO : Ligue pour la Protection des Oiseaux
SToP : Systèmes de production o Pesticide de synthèse

Bibliographie

Aubert, M., Enjolras, G., 2023. Pesticide-Free or IPM: Which ways greenhouse tomato growers choose to reduce Pesticide Use? Poster session presented at XVII EAAE Congress, August 29th – September 1st 2023, Rennes, France.

Brevault, T., Clouvel, P., 2019. Pest management: Reconciling farming practices and natural regulations. *Crop Protection*, 115 : 1-6.

De Bon, H., Huat, J., Parrot, L., Sinzogan, A., Martin, T., Malézieux, E., Vayssières, J.F., 2014. Pesticide risks from fruit and vegetable pest management by small farmers in sub Saharan Africa. A review. *Agronomy for Sustainable Development*, 34: 723-736.

Deguine, J.P., Aubertot, J.N., Bellon, S., et al., 2023. Agroecological crop protection for sustainable agriculture. *Advances in Agriculture*.

- Graindorge, R., Delaunay, J., Huat, J., Lefèvre, A., Marquier, M., Vanhuffel L., 2022. DEPHY EXPE SToP Project: for the transition of current horticultural systems to agroecological systems without chemical uses in a tropical area. In: Dussi, M.C. (Ed.), Simon S. (Ed.), *Acta Horticulturae* 1355: 91-98.
- Guérin-Schneider, L., Tsanga-Tabi, M., Roux, P., Catel, L., Biard, Y. 2018. How to better include environmental assessment in public decision-making: lessons from the use of an LCA-calculator for wastewater systems. *Journal of Cleaner Production* (187): 1057-1068.
- Havard, M., Alaphilippe, A., Deytieu, V., Estrogues, V., Labeyrie, B., Lafond, D., Meynard, J.M., Petit, M. S., Plénet, D., Picault, S., Tchamitchian, M., Faloya, V., 2017. Guide de l'expérimentateur système: concevoir, conduire et valoriser une expérimentation système pour les cultures assolées et pérennes, GIS PICLeg, GIS Fruits, Réseau ECOVITI, RMT Systèmes de culture innovants, GIS Relance agronomique (Eds.), 17 p.
- Huat, J., Aubry, C., Doré, T., 2014. Understanding crop management decisions for sustainable vegetable crop protection: A case study of small tomato growers in Mayotte Island. *Agroecology and Sustainable Food Systems*, 38 : 764-785.
- Karki, L.B., and Bhandari, P., 2023. Preferences of farmers for educational materials to build their capacity for small-scale urban gardening: A case of Maryland. *International Journal of Agricultural Extension and Rural Development Studies*, 10(2): 13-29.
- Lairez, J., Feschet, P., Aubin, J., Bockstaller, C., Bouvarel, I., 2015. Agriculture et développement durable. Guide pour l'évaluation multicritère. Quae et Educagri.
- Penvern, S., Chieze, B., Simon, S., 2018. Trade-offs between dreams and reality: Agroecological orchard co-design. Presented at: 13th European IFSA Symposium, Chania, Grèce, Full paper, <https://hal.inrae.fr/hal-03521089>
- Rezaei, R., Safa, L., Damalas, C. A., Ganjkanloo, M.M., 2019. Drivers of farmers' intention to use integrated pest management : Integrating theory of planned behavior and norm activation model. *Journal of Environmental Management*, 236 : 328-339.
- Ricard J.M., Lauri P.E., Michaud M., Alaphilippe A., Borne S., Penvern S., Dufils A., Simon S., 2022. Co-design of agroecological temperate fruit tree systems in France: the ALTO project. *Acta horticulturae* 1355 : 99-108.
- Sebillotte, M., 1990. Système de culture, un concept opératoire pour les agronomes. In Combe L. et Picard D. (Eds.), Paris, INRA, 196 : 165-19.
- Simon S., Ricard J.M., Lauri P.E., 2019. Temperate fruit-based agroforestry systems: three case studies in Southern France in the framework of the 'ALTO' project. Presented at: 4th World Congress on Agroforestry, Montpellier, France (20-22 May 2019), poster, <https://hal.inrae.fr/hal-02735786>.
- Vidogbena, F., Adegbidi, A., Tossou, R., Assogba-Komlan, F., Ngouajio, M., Martin, T., Simon, S., Parrot, L., Zander, K., 2015. Control of vegetable pests in Benin e Farmers' preferences for eco-friendly nets as an alternative to insecticides. *Journal of Environmental Management*, 147: 95-107.



Mieux appréhender les situations d'usages d'outils et indicateurs agronomiques pour mieux les concevoir : retour d'expériences menées avec l'appui d'IDEAS

Thibault Lefeuvre¹, Lorène Prost², Aude Alaphilippe³, Frédérique Angevin⁴, Nathalie Colbach⁵, Catherine Pasquier⁴, Wilfried Queyrel⁵, Jean Villerd⁵, Marianne Cerf⁶

¹ AgroParisTech Innovation, Plateforme IDEAS, Agronome

² Université Paris-Saclay, INRAE, AgroParisTech, UMR SADAPT, Ergonomes

³ INRAE, UERI Gotheron, 26320 St-Marcel-lès-Valence, Agronome

⁴ INRAE, Info&Sols, 45075 Orléans, Agronome

⁵ Agroécologie, INRAE, Institut Agro, Univ. Bourgogne, Dijon, Agronomes

Email - contact auteurs : thibault.lefeuvre@inrae.fr

Introduction

Lorsqu'ils conçoivent un nouvel objet (par exemple un indicateur), les agronomes y inscrivent un contenu agronomique. Mais sont-ils toujours conscients qu'ils y introduisent aussi la représentation qu'ils ont de l'usage de cet objet ? Par représentation de l'usage, nous entendons représentation de qui sont les potentiels utilisateurs -dans leur diversité- de cet objet, de leur activité -caractérisée entre autres par différents buts et contraintes- et de la façon dont l'objet conçu peut s'insérer dans cette activité. Or, ces représentations peuvent être biaisées ou incomplètes, ce qui peut limiter par la suite l'utilité et l'usage de l'objet conçu (Béguin et Cerf, 2004). A l'interface entre agronomie et ergonomie, les scientifiques du collectif IDEAS ([Initiative for DEsign in Agrifood Systems](#)⁶⁸, cf encadré 1) ont mis au point des démarches pour questionner et enrichir ces représentations : le *diagnostic des situations d'usage* et le *test en situation d'usage* (Cerf et al., 2012). Ces démarches visent à faire reconnaître les futurs utilisateurs comme des contributeurs à part entière au processus de conception. Elles permettent de donner accès à leur activité en situation et/ou de les associer au processus de conception à partir de ce qu'ils considèrent devoir, pouvoir ou souhaiter faire avec les objets conçus.

Dans ce témoignage, nous illustrons comment ces deux démarches ont contribué à la conception d'outils fondés sur des connaissances et des indicateurs agronomiques à travers l'exemple de deux projets, E-DISC et DECIFLORSYS. Nous présentons ensuite les retours des agronomes-concepteurs, porteurs de ces projets, sur ces méthodes et l'accompagnement d'IDEAS.

⁶⁸ <https://ideas-agrifood.hub.inrae.fr/>

Encadré 1 - IDEAS, un collectif mobilisé pour concevoir des méthodes et en accompagner la mise en œuvre

IDEAS est un réseau de scientifiques mobilisés autour des enjeux théoriques et méthodologiques de la conception pour les transitions dans les systèmes agri-alimentaires. Il accompagne, grâce à sa plateforme d'appui et ses chargés d'innovation, des acteurs socio-économiques et/ou des chercheurs en dehors du cœur d'IDEAS souhaitant mettre en œuvre des approches de conception. Cet accompagnement sous forme de prestation est construit en lien étroit avec les scientifiques du réseau car il vient enrichir nos questionnements théoriques et méthodologiques. En effet, chaque cas est l'occasion d'améliorer ces démarches (ex. en proposant de nouveaux supports de travail pour dialoguer avec les concepteurs ou impliquer des utilisateurs) et de pointer des enjeux plus théoriques susceptibles d'être travaillés ensuite dans le réseau (ex. l'influence que peut avoir sur la créativité le choix des supports utilisés pour représenter la diversité des usages) à travers des projets variés.

En plus de cet accompagnement, la Plateforme IDEAS, hébergée par AgroParisTech Innovation, met à disposition des guides méthodologiques (ex. sur le diagnostic des situations d'usage : Lefeuvre et al., 2020). Pour plus de détails sur les modalités d'accompagnement, vous pouvez contacter le réseau via le formulaire du site (<https://ideas-agrifood.hub.inrae.fr/>) ou les auteurs de l'article.

Principes des méthodes autour des situations d'usage

Le *diagnostic des situations d'usage* et le *test en situation d'usage* sont deux démarches formalisées par le collectif IDEAS à partir de différents travaux de recherche ayant impliqué des utilisateurs potentiels dans la conception d'objets innovants (ex. outils d'aide à la conduite de cultures, d'évaluation de variétés).

Le diagnostic vise à enrichir les représentations des concepteurs quant aux futurs utilisateurs et aux usages anticipés de l'objet en cours de conception. Il s'agit, d'une part, de faire objectiver et d'élargir l'enjeu à traiter par les concepteurs afin d'ouvrir des pistes de conception prometteuses et, d'autre part, d'aider à cibler le public visé en lien avec cet enjeu, dans sa diversité. Le diagnostic prend généralement la forme d'entretiens semi-directifs, auprès d'une diversité d'utilisateurs potentiels. Ces entretiens cherchent à comprendre comment ils se représentent l'enjeu ciblé dans leur activité, la place que cet enjeu y prend et leurs façons d'y répondre, mais aussi les ressources dont ils disposent aujourd'hui et les contraintes qu'ils rencontrent dans leur activité pour mobiliser ces dernières. Cette démarche peut aussi reposer sur l'analyse de divers documents qui permettent de comprendre l'activité ciblée, sur l'observation d'actions spécifiques en conditions réelles, ou encore sur des ateliers type « focus-group » avec divers acteurs.

Le test en situation d'usage vise à aider les concepteurs à se projeter dans les activités individuelles et collectives, en y simulant l'usage de l'objet en conception. Représenter ces situations d'usage en lien avec l'objet est nécessaire pour le rendre fonctionnel et en tirer des enseignements sur la façon de faire évoluer conjointement l'objet et les activités concernées par son usage. Le test se base sur une version au moins partiellement matérialisée de l'objet, créée par les concepteurs (ex. une maquette plus ou moins manipulable, un dessin ou une image). Plusieurs itérations sont possibles⁶⁹.

Dans les deux cas, l'activité est abordée dans sa dimension collective et située : les utilisateurs potentiels ne sont pas isolés et ont déjà potentiellement une façon de traiter l'enjeu ciblé. Il s'agit donc de donner à voir la diversité des acteurs et de leurs activités en mettant en lumière les objets et ressources qu'ils mobilisent déjà, y compris des ressources immatérielles (ex. un conseiller ou un collectif de pairs peuvent être une ressource qui contribue fortement à la réflexion d'un agriculteur autour d'un changement de pratiques en lien avec un enjeu que des concepteurs souhaiteraient aussi outiller). Ces deux démarches ne sont pas toujours déployées dans un même processus de conception. L'une est parfois privilégiée à l'autre selon le niveau de maturité des idées des concepteurs. La mise en œuvre d'un test en situation d'usage nécessite, quoiqu'il en soit, une étape

⁶⁹ Ces itérations peuvent rappeler la méthode AGILE, mais le système d'acteurs visé n'est pas le même. Ici, on parle moins d'une réponse à un client commanditaire d'un projet ou d'interactions centrées sur l'évolution d'une interface.

de diagnostic pour proposer des mises en situations simulées mais réalistes, c'est-à-dire inspirées des façons de faire existantes afin de traiter la problématique que l'objet en cours de conception doit outiller. Selon les projets, ces démarches se déroulent de façon plus ou moins collaborative entre ces différents acteurs : ceux qui portent la gouvernance du projet, ceux qui réalisent le travail de conception et les futurs utilisateurs et ce, à différents stades d'avancement du processus de conception (Fig. 1).

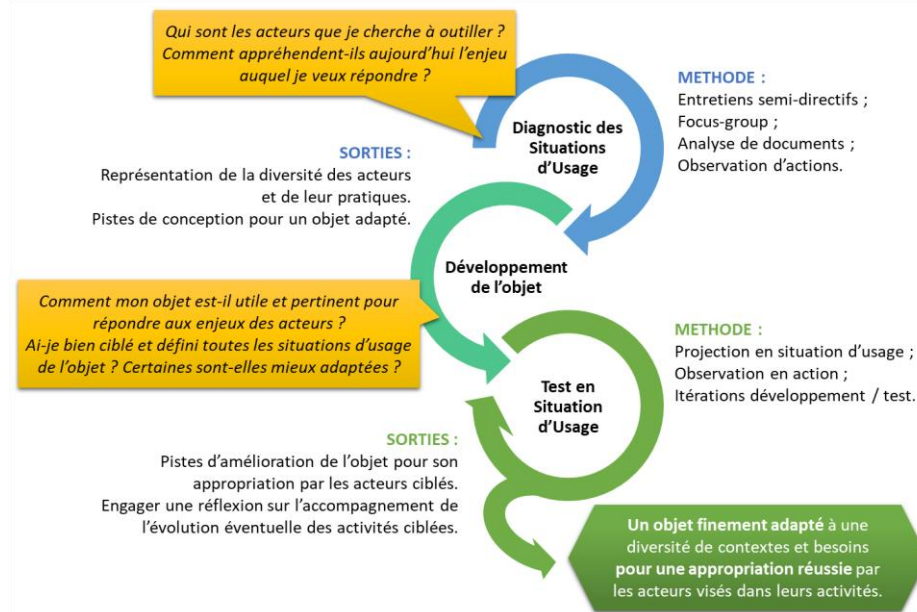


Figure 1 : Processus de conception d'un nouvel objet mobilisant un diagnostic des situations d'usage puis un test de prototype en situations d'usage représentant les questionnements que peut avoir le concepteur. NB : des boucles itératives peuvent avoir lieu entre le développement et le test au cours du processus de conception.

Deux projets dans lesquels ces démarches sont déployées

E-DISC : enjeux et représentation des situations d'usage de l'évaluation de la durabilité des systèmes de culture

Le projet E-DISC part du constat que les outils d'évaluation multicritères de la durabilité MASC (Craheix et al., 2012) et DEXi Fruits⁷⁰ (Alaphilippe et al., 2017) sont sous-utilisés en dehors des communautés de recherche et des premiers utilisateurs mobilisés lors de leur conception. Ces deux modèles reposent sur la technologie DEXi (Bohanec, 2015)⁷¹, qui permet de décomposer la durabilité (notion complexe) selon une approche classique en trois piliers (durabilité économique, sociale et environnementale) puis en critères simples plus faciles à renseigner avec des données récupérables sur le terrain (pratiques, mesures, indicateurs). Les données d'entrée sont entièrement qualitatives, ce qui rend possible l'intégration de l'expertise de l'utilisateur (par exemple lors de l'évaluation de systèmes innovants).

⁷⁰ Les outils sont téléchargeables à cette adresse : <https://means-refonte.hub.inrae.fr/outils-emc>

⁷¹ <https://kt.ijs.si/MarkoBohanec/dexi.html>

Pour l'utilisateur, la structuration du modèle sous forme d'un arbre de décision est didactique et facilement accessible dans le logiciel DEXi et il peut aussi voir les poids relatifs qui sont accordés aux différentes parties de l'arbre pour une complète transparence sur le fonctionnement de l'outil.

Les porteuses du projet ont pour objectif de reconcevoir ces outils pour en faciliter l'usage dans le cadre de l'évaluation de la durabilité pour des systèmes de cultures annuelles ou pérennes. Elles cherchent à les rendre plus opérationnels en levant les verrous méthodologiques identifiés par les premiers utilisateurs et en tenant compte des conditions de l'usage de ces outils. Le projet de reconception prévoit de conserver l'architecture des outils sous forme d'arbre de décision, mais s'autorise à questionner le besoin de modifications pour en améliorer leur utilisation. Différentes évolutions sont d'ores et déjà envisagées. Il est ainsi prévu de développer les branches économiques et sociales en intégrant des critères supplémentaires, ainsi qu'une aide au choix dans la base INDIC⁷² qui recense les méthodes et indicateurs d'évaluation de la durabilité, de façon à pouvoir recommander les indicateurs les plus pertinents en fonction des conditions d'usage (en fonction des données facilement disponibles, par exemple). Un package R permettant des analyses de sensibilité de ce type de modèles est aussi en cours de développement. Des travaux ont aussi fourni des référentiels aux utilisateurs ainsi que l'intégration d'une méthode limitant les effets de seuils (Bockstaller *et al.*, 2017) dans ces modèles qualitatifs. Mais les conceptrices de ces outils souhaitent aussi explorer de nouvelles pistes. Le chargé d'innovation de la Plateforme IDEAS a conduit un diagnostic des situations d'usage des outils MASC et DEXiFruits, en ciblant trois types d'activité, y compris hors recherche, dans lesquelles les conceptrices projettent leurs modèles : le conseil agricole, l'enseignement et l'expérimentation-système.

Nous avons réalisé 21 entretiens semi-directifs avec des utilisateurs potentiels de différents organismes (ex. instituts techniques, chambres d'agriculture, lycées agricoles, écoles d'ingénieur, GAB ou CIVAM...). Ces derniers ont été identifiés grâce aux conceptrices mais aussi via la méthode dite « boule de neige » pour couvrir une diversité d'acteurs évaluant la durabilité de systèmes de culture (avec MASC ou DEXiFruits, d'autres outils mais aussi sans outil spécifique). L'objectif était d'explorer qualitativement une diversité de situations d'usage en questionnant les utilisateurs sur la place qu'a l'évaluation de la durabilité dans leur activité, sans pour autant chercher à atteindre l'exhaustivité des façons de faire. Nous avons formalisé la diversité que nous avons captée sous la forme de sept récits d'action, inspirés du système d'activité d'Engeström (2014) et incarnés par sept *personae*. Ces sept récits et *personae* regroupent des caractéristiques de plusieurs personnes enquêtées, que nous avons jugées proches, et permettent de refléter des façons contrastées de positionner l'évaluation de la durabilité dans les activités de conseil, de formation et d'expérimentation identifiées dans notre diagnostic. Chaque récit associé à une *persona* permet de représenter un utilisateur potentiel ancré dans un environnement. La description vise à faire ressortir différentes contraintes ou attentes liées à sa façon d'agir pour atteindre les objectifs de son activité en lien avec l'enjeu ciblé (Bornet *et al.*, 2013).

Les paires « récit-persona » rendent compte de différentes façons de mobiliser l'évaluation multicritère pour atteindre divers buts dans leur activité, de la non-utilisation de ce type d'évaluation, ou d'une évaluation qui ne considère pas les trois piliers de la durabilité. Le tableau 1 donne un aperçu de la diversité de ces *personae*, de leurs activités et de leurs motivations et attentes formulées. Soulignons que des tensions sur la place de l'évaluation et des outils dans leur activité ressortent de façon commune (ex. complexité et temps de remplissage des outils ; outils jugés peu intuitifs ; manque d'interopérabilité avec d'autres outils comme des questionnaires de parcelles). La plupart des personnes enquêtées se déclarent non-expertes de la durabilité ou des outils, même si certaines de ces personnes ont participé à leur conception. Ces récits ont été utilisés dans un atelier au cours de l'Assemblée Générale du projet du 9 déc. 2022, en impliquant les partenaires présents selon leurs capacités et compétences à développer des outils d'évaluation et/ou à incarner des utilisateurs plus ou moins initiés compte tenu d'expériences passées (« lead-

5. <https://www.gchp2e.fr/Actualites/INDIC-R-Une-base-de-donnees-telechargeable-sur-le-site-du-GIS-GC-HP2E>

users »). En sous-groupes par catégorie d'activité (conseil, formation, expérimentation), ces partenaires ont construit des propositions principalement fonctionnelles pour l'amélioration des outils MASC et DEXiFruits en incarnant les *personae* et leurs récits d'action. Ces propositions ont été formulées dans un cadre très ouvert pour chercher à apporter des fonctionnalités pertinentes et utiles à ces différents *personae*, sans qu'une priorisation de ces propositions ne soit réalisée en atelier. Une deuxième phase du projet prévoit de tester des prototypes des nouvelles versions de ces deux outils dans une diversité de situations d'usage dont les modalités restent à définir.

Tableau 1 : *Personae* produites comme livrable du diagnostic des situations d'usage dans E-DISC pour mettre en récit une diversité de situations d'usage de l'évaluation de la durabilité

Persona	Activité en lien avec l'évaluation de la durabilité	Extrait des motivations et attentes formulées
 Sandrine	Conseillère évaluatrice régulière de la durabilité : Animatrice CIVAM depuis 18 ans, très autonome. Elle travaille avec 11 agriculteurs en GIEE et a régulièrement recours à l'évaluation de la durabilité de leurs systèmes via des indicateurs de suivi et des diagnostics complets plus ponctuels avec MASC ou DEXiPM.	L'évaluation de la durabilité est liée à l'approche système, elle permet d'objectiver et discuter d'améliorations à apporter. Elle l'utilise pour tracer des évolutions et renforcer la confiance des agriculteurs. Elle manque de temps et à besoin d'appui pour faire les diagnostics complets. Certains critères gagneraient à être à l'échelle de l'exploitation plutôt qu'au système, et une réflexion sur l'autonomie serait un plus. Elle aimerait pouvoir prendre en compte les considérations des agriculteurs pour leurs résultats et estimations personnelles, et ne pas devoir se positionner par rapport à un modèle de référence extérieur.
 Jean-Philippe	Conseiller non évaluateur : Technicien-conseiller en arboriculture en Chambre d'Agriculture depuis 23 ans, il encadre l'activité d'autres conseillers de son service et suit 65 agriculteurs en collectifs et en individuel. Il ne travaille pas sur la durabilité ou son évaluation.	Il est sensibilisé aux notions de durabilité et en questionne les dimensions dans ses échanges avec les producteurs, mais les définitions de la durabilité sont trop floues pour être standardisées. Pour lui, l'évaluation de la durabilité ne correspond pas à une demande des producteurs ou des filières qui préfèrent des labels à des évaluations multicritères.
 Sandra	Conseillère évaluatrice novice de la durabilité : Conseillère en arboriculture en GAB et animatrice d'un GIEE depuis 2 ans. Elle n'a réalisé qu'une évaluation multicritère en découpant les volets de la durabilité avec l'outil DiagAgroEco proposé par la DRAAF pour l'évaluation obligatoire de démarrage de GIEE.	Les agriculteurs sont peu demandeurs et ils fixent leurs priorités ailleurs pour le GAB. Donc en dehors de l'évaluation obligatoire du GIEE, il y a peu de place pour l'évaluation de la durabilité dans son activité. De plus elle manque de connaissances et compétences sur les outils existants, sur l'interprétation des résultats et sur comment les utiliser comme un outil d'animation du groupe. La faible discrimination entre systèmes en AB limite aussi l'usage des outils.
 Stéphanie	Formatrice enseignement supérieur agri/agro : Enseignante-Chercheuse en agronomie en école d'ingénieur depuis 12 ans sur les approches systémiques et la conception-évaluation de SDC. Elle intervient progressivement dans différents modules, de la sensibilisation générale à l'utilisation voire la création de quelques indicateurs, ou le déploiement d'une démarche complète comme IDEA4 avec l'aide de collègues experts.	Bien qu'elle ne se considère pas comme experte, elle approche la durabilité par ses 3 piliers : économie, social et environnement, et enseigner son évaluation est incontournable pour approcher la complexité, la diversité et la transversalité des systèmes agricoles. Certains étudiants ont du mal à s'approprier ces approches conceptuelles et elle a parfois besoin de faire des simplifications. Elle déplore un manque d'outils sur certaines filières ou pratiques mais elle formule peu de demande d'amélioration des outils. Par contre elle serait intéressée par une communauté d'utilisateurs dans laquelle échanger des manières de pratiquer l'évaluation.
 Clément	Formateur enseignement technique agri/agro : Formateur en agronomie dans un CFPPA horticole depuis 3 ans, il est notamment responsable d'un module transversal d'évaluation multicritère et d'approche globale de l'entreprise dans le BPREA. Il travaille surtout à l'échelle exploitation, et demande aux étudiants de réaliser un diagnostic de leur entreprise de stage, avec un outil (DEXi Fruits, PlanteBleue, ou juste quelques indicateurs).	Il aborde la durabilité tôt dans la formation, par l'approche de la triple performance, en allant des indicateurs à des diagnostics et outils faciles d'accès pour en discuter la pertinence. Son objectif est d'émanciper les stagiaires en montrant l'intérêt de diagnostics chiffrés. Son usage actuel des outils et concepts d'évaluation de la durabilité lui convient, même s'il aimerait pousser les approches systémiques dans les cours d'autres collègues. Il se questionne sur l'impact qu'aura la rénovation des BTS de 2023 incluant davantage les enjeux de durabilité sur le BPREA.
 Jérôme	Expérimentateur évaluateur régulier de la durabilité : Ingénieur régional Arvalis depuis 17 ans, il est responsable du pôle systèmes innovants et durabilité. Il conçoit, expérimente de nouveaux SDC et en évalue les performances avec l'outil SYSTERRE. Il évalue les systèmes dès leur conception pour en estimer les performances et les améliorer, puis tous les ans de façon systémique sur l'ensemble des parcelles pour orienter les prochaines expérimentations. Les résultats des évaluations sont présentés à des agriculteurs, aux partenaires techniques et valorisés dans des articles ou des formations.	Il évalue la durabilité sur les volets économique, performance agronomique et technique (incluant des indicateurs sociaux), et environnement. Il déclare peu de freins, il est autonome et délègue la saisie très chronophage des données. Il trouve SYSTERRE en retard sur les indicateurs environnementaux et sociaux. Pour lui ces outils d'évaluation sont trop complexes pour une utilisation directe par des agriculteurs, et les visuels des sorties ont besoin d'être retravaillés pour être plus illustratifs et synthétiques.
 Aurélie	Expérimentatrice évaluatrice partielle de la durabilité : Technicienne de recherche INRAE depuis 12 ans, elle travaille sur une plateforme d'essais systèmes dans un projet de recherche. Elle réalise une évaluation ponctuelle de la multiperformance des systèmes expérimentés à l'échelle de la parcelle avec des indicateurs issus de MASC ou INDIIGO mais sans les agréger dans un outil. L'évaluation a lieu au lancement des essais et à la fin d'un cycle de 5 ans.	Elle ne cherche pas à évaluer la durabilité des systèmes car le volet social, jugé trop difficile à évaluer en station et à extrapoler, n'est pas inscrit dans son projet. Elle fait face à des contraintes de moyens d'observation et d'évaluation liées au projet et aurait aimé pouvoir prolonger les essais systèmes. De ce qu'elle connaît des outils comme MASC, l'analyse ne permet pas toujours de bien discriminer des systèmes bas intrants. Elle aimerait aussi d'avantage d'indicateurs sur les émissions de gaz à effet de serre. Elle déplore un manque de communication sur les outils et leur intérêt pour des producteurs ou des filières, et la création d'une communauté d'utilisateurs pour partager des références et aider à se lancer.

DECIFLORSYS : contexte du projet et développement d'un outil en interaction avec des utilisateurs potentiels.

Dans le projet DECIFLORSYS, porté par l'UMR Agroécologie (Dijon), l'objectif était de concevoir une interface graphique pour un outil d'aide à la conception de systèmes de culture tenant compte des objectifs de gestion des adventices de l'agriculteur au sein d'une parcelle. Cet outil se base sur un modèle de recherche complexe déjà fonctionnel, FLORSYS (Colbach et al., 2019). FLORSYS est un modèle qui simule la croissance et le développement des cultures et de la flore adventice sur une parcelle virtuelle à partir du pédoclimat et des opérations culturales. Les sorties comprennent à la fois des mesures virtuelles détaillées des états des cultures, adventices et sol ainsi que des indicateurs d'impact de la flore adventice sur la production agricole, la biodiversité et l'environnement physique.

Un travail préalable (Colas et al., 2020) basé sur des enquêtes avec des conseillers et des agriculteurs avait montré un intérêt de ces utilisateurs potentiels pour les concepts du modèle, mais aussi la nécessité de les transposer sous la forme d'un nouvel outil encore à concevoir. Pour les acteurs enquêtés, ce nouvel outil devait être simplifié, accessible et réactif avec une vitesse de calcul beaucoup plus rapide que le modèle FLORSYS. Ce nouvel outil vise à apporter un appui à la reconception de systèmes de culture, notamment dans des situations de conseil agricole ou pour un agriculteur seul. Le travail de Colas et al. a conduit à construire un premier prototype (encore sous forme de maquette et de script R) de l'outil DECIFLORSYS avec des arbres de décision pour guider la reconception de systèmes de culture (Fig. 3a), des grilles expliquant les effets des techniques culturales sur la flore adventice et un calculateur rapide des indicateurs de services et disservices des adventices en fonction du système.

Tout au long du développement de l'outil dans ce projet avec la Plateforme IDEAS, des tests en situation d'usage ont été mis en place avec différents utilisateurs potentiels, en lien avec les partenaires du projet (Arvalis notamment), ou des conseillers de la région Bourgogne-Franche-Comté déjà plus ou moins connus de l'équipe de concepteurs (Tab. 2). Les premières interactions (tests « gribouillage » et vocabulaire) se sont faites sur une « maquette papier », à savoir un fichier Powerpoint sur lequel les concepteurs avaient représenté ce qu'ils imaginaient être la future interface, les contenus et la succession des écrans (Fig. 3a). La maquette a été envoyée à des participants partenaires ou proches, avec quelques explications et des grilles de notation et l'objectif était de tester, dans un premier temps, comment la navigation, le contenu ou encore le vocabulaire employé pouvaient correspondre aux attentes des acteurs, en s'autorisant une expression très libre et sans être fixé par un développement informatique déjà trop abouti.

Les interactions suivantes ont eu lieu dans trois ateliers en distanciel⁷³ avec des conseillers ou des ingénieurs Arvalis. Ces ateliers étaient centrés sur un prototype codé dans une interface R-Shiny⁷⁴, peu fonctionnel pour les deux premiers ateliers et plus manipulable pour le troisième, le prototype évoluant donc au fil des ateliers (Fig. 3b). Ces tests ont porté sur la façon dont le prototype était compréhensible et manipulable d'après l'expertise des participants. Il s'agissait aussi lors de ces tests de les inciter à décrire dans quelles situations les participants projetaient l'usage de l'outil. Au-delà d'un simple test de l'interface et de sa praticité, l'objectif était de valider et compléter, sur la base de leur expertise, les situations d'usage d'un tel outil imaginées par les concepteurs.

⁷³ La modalité « visioconférence » a été privilégiée pour ces ateliers à cause du contexte « covid » et maintenue puisque, en petits groupes, les interactions ont été fluides et la qualité du test n'a pas été impactée.

⁷⁴ <https://rstudio.github.io/shiny/authors.html>

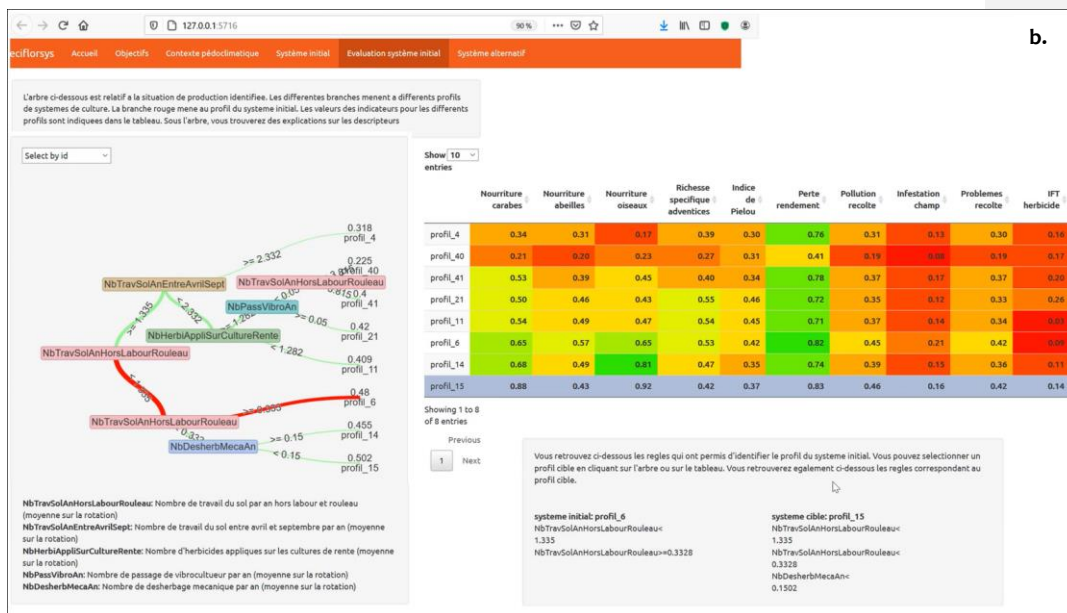
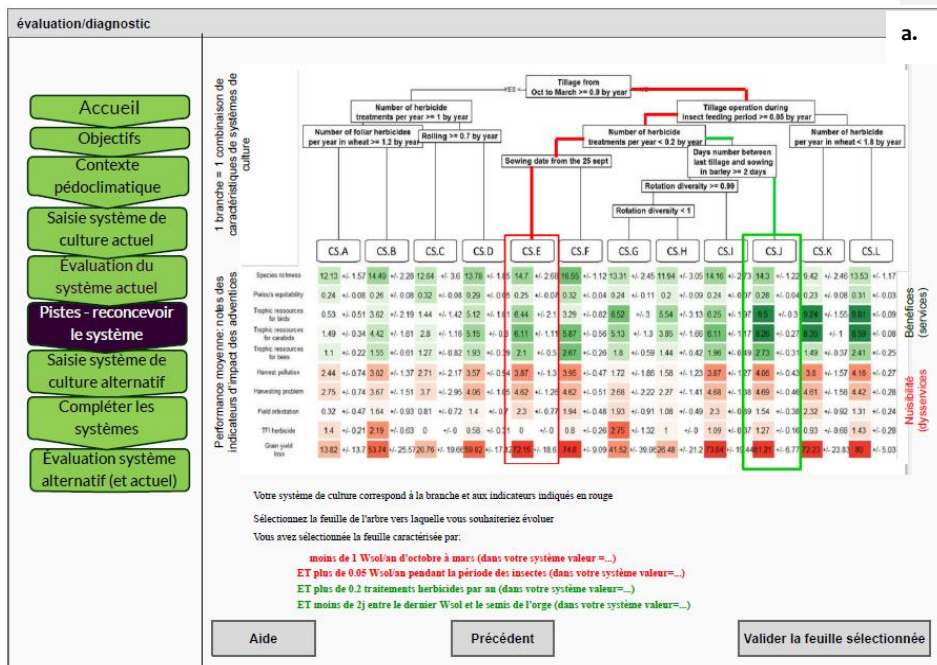


Figure 2 : Evolution de l'arbre de décision guidant la reconception des systèmes de culture et le tableau d'évaluation des systèmes dans les différents prototypes : maquette papier (a) et prototype R-shiny fonctionnel (b).

Ces interactions régulières avec une diversité d'utilisateurs potentiels ont guidé le développement de l'outil. Elles ont permis d'identifier des améliorations techniques : format des onglets, de la saisie ou l'affichage de l'évaluation de la performance des systèmes de culture, par exemple. Elles ont aussi mis en lumière des idées d'évolution plus globale de l'environnement de l'outil. En effet, la façon de présenter son contenu et son contexte de construction est vite ressortie comme clé pour comprendre son fonctionnement. Ceci a fait émerger un besoin de développer une formation sur les concepts sous-jacents (ex. évolution de la perception des adventices et de leur gestion) au-delà de simples fiches techniques sur la façon d'utiliser l'interface.

Tableau 2 : Articulation des différents tests du prototype de l'outil DECIFLORSYS à différentes étapes de son développement et les principaux éléments discutés à la suite

Evolution de DECIFLORSYS	Maquette papier	Prototype R-shiny de démonstration		Prototype R-Shiny fonctionnel
Tests (date)	Tests « gribouillage » et vocabulaire (mars & juin 2020)	1 ^{er} test conseillers (dec. 2020)	Test ingénieurs (fev. 2021)	2 ^e test conseillers (mai 2021)
Participants	Equipe projet & partenaires Arvalis	Conseillers de Chambres d'agriculture et InterBio	Ingénieurs Arvalis	Conseillers de Chambres d'agriculture et InterBio
Éléments de discussion issus des tests	1ers retours sur la compréhension générale de l'outil, son format, le contenu et l'adéquation du vocabulaire utilisé dans l'outil avec les termes employés par les utilisateurs.	Intérêt pour l'outil et ses utilisations potentielles, mise en évidence d'un besoin de contextualisation de l'outil et d'explicitation d'une différence de perception de la flore entre « densité » et « impact ».	Identification de lien avec les situations d'expérimentations et l'outil Systerre ; lien à des actions de formations de conseillers, d'agriculteurs ou d'étudiants.	Suggestions d'améliorations sur la saisie des pratiques, sur l'arbre d'évaluation du système de culture et de l'onglet d'évaluation.

Le développement de DECIFLORSYS se poursuit dans d'autres projets, notamment COPRAA⁷⁵ avec des tests en situations réelles d'activité prévus, notamment lors d'ateliers de co-conception de systèmes de culture dans des collectifs d'agriculteurs. L'objectif est d'analyser (i) comment le prototype fonctionnel de l'outil s'applique à la situation d'usage testée et répond aux attentes des participants, et (ii) comment des animateurs plus ou moins expérimentés, ainsi que leurs collectifs d'agriculteurs, se saisissent d'un tel outil et de ses résultats, de façon autonome ou accompagnée.

Retour des concepteurs porteurs de ces deux projets sur l'accompagnement d'IDEAS et le déploiement de ces deux méthodes autour des situations d'usage.

Dans les deux projets accompagnés, les agronomes-concepteurs accompagnés par IDEAS ont partagé leur intérêt pour chacune de ces démarches qu'ils ne connaissaient pas en amont. Dans des entretiens que nous avons menés avec chacun d'eux pour capter leurs retours, ils pointent que ces démarches demandent une certaine acculturation sur les concepts issus de l'ergonomie, mais ils pointent aussi l'aspect « décalant » qui leur a été bénéfique.

Retour sur l'accompagnement du diagnostic des situations d'usage au sein du projet E-DISC

Le retour des porteuses du projet E-DISC a été recueilli pour écrire ce témoignage avant la fin du projet et la reconception globale des deux outils MASC et DEXi-Fruits. Ainsi, l'exploitation complète des sorties du diagnostic n'est pas encore réalisée.

D'après l'une des conceptrices, l'approche par les situations d'usage l'a notamment aidée à se détacher de sa vision initiale centrée sur les outils. Cette vision s'est trouvée élargie par les échanges avec IDEAS sur « qui cherche à utiliser ces modèles et dans quel but ». Cela lui a suggéré d'autres éléments d'amélioration plus pertinents que ceux envisagés lors de la construction du projet.

⁷⁵ <https://www6.inrae.fr/projet-copraa/>

L'approche par les *personae* a été, pour une autre des conceptrices, particulièrement intéressante. Elle ne la connaissait pas et ne soupçonnait pas son efficacité pour restituer les sorties des enquêtes réalisées. Selon elle, il est souvent difficile de formaliser ces dernières pour permettre leur mobilisation dans la conception. La *persona* lui a permis d'intégrer de façon cohérente et systémique ce que disent les personnes enquêtées. Elle a favorisé une première assimilation de ces éléments et permis de nouvelles réflexions entre développeurs sur les interfaces. En effet, ces *personae* ont conduit l'équipe à s'interroger sur la façon dont les modifications des outils répondent ou non à des besoins ou contraintes illustrées par ces dernières. Ceci a permis aux concepteurs de prendre du recul sur leurs propres représentations des utilisateurs et de leurs besoins.

En plus de l'interface des outils destinée aux utilisateurs de résultats d'évaluation, les conceptrices envisageaient de créer dans le cadre du projet une seconde interface à destination d'une communauté de concepteurs ou développeurs d'outils de type DEXi, en ajoutant un module d'analyse de sensibilité. Le diagnostic n'a pas remis en cause l'intérêt de ce besoin, mais à travers certaines *personae*, nous avons mis en évidence et renforcé la représentation d'une catégorie d'acteurs qui reconstruisent des outils en sélectionnant quelques indicateurs de différents outils pour un usage simplifié. Cette troisième catégorie d'« utilisateurs-reconcepteurs », et l'instrumentalisation qu'ils font des outils d'évaluation, y compris en bricolant des calculateurs hors modèle DEXi, a questionné les conceptrices sur la qualité prédictive de ces outils dérivés ou composites. De ce constat, il est apparu nécessaire de proposer un module d'analyse de sensibilité, non seulement à destination de la communauté de concepteurs aguerris, comme prévu au début du projet, mais également pour cette nouvelle catégorie d'utilisateurs-reconcepteurs. Un module présentant une interface adaptée sera en mesure de pointer des risques de mauvaise interprétation des résultats avec, par exemple, des critères qui auraient trop ou pas assez de poids sur le résultat final sans qu'il y ait de justification avérée à cela. Ainsi, ce module pourrait soutenir les utilisateurs dans leurs actions d'évaluation de systèmes, que ce soit dans une optique d'expérimentation, de conseil agricole ou de formation à l'évaluation et à ses dimensions systémiques.

Retour sur l'accompagnement par le test de prototype en situation d'usage dans le projet DeciFlorSys

À la fin du projet DECIFLORSYS-PlantzPro, lors d'un entretien semi-directif mené pour capter leurs retours sur la démarche, les concepteurs de l'OAD de l'UMR Agroécologie ont partagé un intérêt pour la réflexion sur les acteurs et leurs situations d'usage. Les approches portées par IDEAS étaient nouvelles pour eux. D'après eux, les différents ateliers mis en place ont permis d'affiner leurs représentations des utilisateurs potentiels et de leurs situations d'usage. L'approche itérative a permis de structurer des idées et intuitions encore floues, de clarifier les différences entre des manières d'utiliser l'outil et d'extrapoler autour de nouveaux usages. De fait, le travail a surtout permis de fournir des précisions sur des situations d'usage et des utilisateurs d'ores et déjà anticipés par les concepteurs.

Une difficulté remontée par les développeurs de DECIFLORSYS a été de travailler sur des objets et des directions encore flous, avec des maquettes très précoces. D'après eux, cela a eu l'avantage de laisser de côté tout ce qui concerne la dimension technique de l'objet. Néanmoins, des difficultés techniques peuvent apparaître au fil du développement logiciel de l'outil. De plus, la pluralité des tests, à différents moments de développement, a pu faire émerger des retours de différents utilisateurs potentiels qui s'avéraient parfois contradictoires avec les précédents. Cela montre que les concepteurs sont amenés à devoir prioriser ces retours, potentiellement contradictoires, et arbitrer des décisions selon leurs objectifs (ex. sur la manière de représenter l'arbre de décision).

Une particularité de cet accompagnement a résidé dans le fait que le cœur de l'outil, issu d'interactions passées avec des utilisateurs et basé sur un méta-modèle du modèle FLORSYS, ne pouvait plus être remis en question. Cela nous a amenés à surtout focaliser les échanges sur le format de l'outil, le vocabulaire qui y est inscrit, la façon de saisir ou présenter des sorties et l'environnement de mise à disposition de l'outil (support technique, formation...). Pourtant, le

travail conduit a amené à clarifier les concepts sous-jacents à l'outil. Ainsi, les acteurs consultés ont souligné que la vision portée sur la gestion des adventices dans l'outil était en décalage avec les pratiques dominantes de gestion. En effet, alors que les pratiques habituelles se centrent sur une gestion de la densité et la composition de la flore, l'outil oriente vers une gestion centrée sur l'impact réel de la flore adventice (les services ou disservices qu'elle peut rendre). Ce focus sur l'impact est une volonté des concepteurs et leur semble indispensable pour faire évoluer la perception qu'ont les agriculteurs et conseillers des adventices. Pour les concepteurs, une telle évolution dans la façon de penser la gestion des adventices est indispensable pour la transition agroécologique. En effet, pour concevoir des systèmes de culture économes en herbicides et durables et termes de contrôle des adventices, il est indispensable de limiter leur nuisibilité réelle et de promouvoir leurs services, sans viser leur éradication à tout prix. Ces échanges, initiés par le test en situations d'usage ont amené les concepteurs à prendre conscience que DECIFLORSYS n'est pas simplement un outil qui accompagne la gestion des adventices, mais aussi un outil qui accompagne un changement de regard sur la flore et sa gestion. Cela les a donc amenés à se questionner, certes sur l'outil en lui-même, mais également sur l'environnement et la diffusion de l'outil. Cela a abouti à la construction d'une formation préalable à l'usage de l'outil qui soit adaptée aux différentes conditions d'activités testées. Celle-ci est axée sur les concepts sous-jacents du modèle, ce qui n'était pas du tout envisagé au début du projet. La formation insiste sur cette nouvelle façon de considérer les adventices et leur gestion, pour inciter à une approche plus agroécologique et favoriser la transition et la reconception des systèmes de culture (y compris la rotation) en suggérant des changements de pratiques adaptés aux critères retenus par l'utilisateur dans ce contexte.

L'autre particularité de cet accompagnement, discutée avec les porteurs du projet, a été la présence d'une personne « relais ». Celle-ci était à la fois proche des développeurs du prototype mais aussi familière des approches de co-conception de systèmes de culture. Cela a facilité les échanges avec IDEAS et la co-animation des différents tests, leur préparation et leur analyse. Cela a permis aux concepteurs-développeurs de mieux s'approprier la démarche et de monter en compétence sur l'approche des situations d'usage. L'équipe de l'UMR qui développe FLORSYS continue le travail sur le développement de DECIFLORSYS et sur un nouvel outil, OPTIFLORSYS, en adaptant la démarche avec un accompagnement plus léger de la Plateforme IDEAS et une plus grande autonomie sur le test en situation d'usage.

Appropriation par les concepteurs

De façon plus générale, nous constatons une appropriation de ces méthodes et concepts par les agronomes-concepteurs que nous avons accompagnés dans ces deux projets, notamment en réalisant d'autres ateliers « gribouillages » sur des maquettes papiers de nouveaux outils dans un autre projet dans lequel IDEAS n'est pas impliqué. Pour la conceptrice interrogée, c'est une expérience très intéressante qui a permis aux utilisateurs de demander librement des améliorations très diverses dans les outils mais aussi aux concepteurs de capter beaucoup de besoins par rapport à un usage futur sans passer par des séries d'enquêtes. Cela fait de la maquette papier un objet intermédiaire très intéressant pour requestionner le prototype plus en profondeur qu'avec une interface déjà développée, en demandant beaucoup moins de travail pour assurer des discussions riches.

Conclusion

IDEAS a formalisé deux démarches, le diagnostic des situations d'usage et le test en situation d'usage, qui sont complémentaires dans des processus de conception. Elles incitent les agronomes-concepteurs à questionner leurs représentations des utilisateurs potentiels et les contextes dans lesquels ils pourraient être amenés à utiliser l'objet conçu. L'objectif est de déplacer le regard des concepteurs habituellement focalisé sur l'objet vers une représentation plus globale de l'activité

dans laquelle l'objet prendrait place. Cette représentation de l'activité est attentive aux enjeux des acteurs ciblés, leurs contraintes et modes d'organisation collective pour traiter une problématique (évaluer des systèmes, faire évoluer des façons de gérer des adventices). Les éléments mis en évidence dans ces démarches les amènent à s'interroger sur les décalages éventuels entre leur vision de l'agroécosystème et celles que peuvent avoir les futurs utilisateurs dans leurs activités. L'accompagnement proposé par la Plateforme IDEAS, dans les deux projets pris pour exemples, a rempli cet objectif de clarification des usages potentiels. Il a permis aux concepteurs de travailler sur la pertinence des entrées et sorties proposées, de réfléchir à la façon de mettre en forme des versions adaptées tout en réfléchissant aux compromis à gérer pour s'adapter à la diversité des usages potentiels (ex. quelle flexibilité donner à l'outil pour s'adapter à la diversité ? S'il y a « cristallisation » d'un utilisateur et d'un usage, quels supports proposer pour d'autres utilisateurs ou usages ?). L'accompagnement de la plateforme IDEAS a permis de mettre en avant des enjeux de pédagogie bien au-delà de la formation à l'usage opérationnel de l'outil. Ainsi, il pointe la nécessaire formation au modèle (de gestion des adventices, de la logique d'agrégation multicritère) qui sous-tend l'outil. Dans un des deux projets, cela a orienté vers l'idée de généraliser un module d'analyse de sensibilité du modèle pour être plus transparent sur le fonctionnement de l'outil. Il s'agit ainsi d'outiller les utilisateurs dans leur « instrumentalisation » (i.e. l'adaptation de l'outil par l'utilisateur dans son appropriation pour sa situation d'usage) des indicateurs présents dans l'outil. Dans l'autre projet, cet enjeu s'est notamment traduit par le montage d'une formation sur les concepts sous-jacents, notamment pour accompagner le changement de paradigme que porte l'outil pour la transition agroécologique. Ces démarches formalisées par IDEAS sont en évolution constante. Nous les enrichissons au fil de leurs mises en œuvre dans des cas d'étude variés par les apprentissages que nous faisons de notre posture d'accompagnement en réponse à une sollicitation, ou/et par les retours de concepteurs qui s'en saisissent.

Remerciements

Nous remercions l'ensemble des participants à ces projets, partenaires, acteurs enquêtés et ayant participé aux ateliers de tests. Merci également aux porteurs de projets d'avoir fait confiance à IDEAS et sa plateforme pour déployer ces démarches. Enfin, merci aux financeurs de ces projets, Plant2Pro (projet DECIFLORSYS, 2020-2021), et l'Office Français de Biodiversité dans le cadre du plan Ecophyto, 2021-2024 (projets COPRAA, 2021-2024 et E-DISC, 2021-2024).

Références

- Alaphilippe, A., Angevin, F., Guérin, A., Guillermin, P., Vélou, A., Zavagli, F., 2017. DEXiFruits, un outil d'évaluation multicritère des systèmes de production de fruits : d'un outil recherche à un outil terrain. Un outil co-construit. *Innovations agronomiques* 59, 1-11. [<hal-01652911>](#)
- Beguïn, P., Cerf, M., 2004. Formes et enjeux de l'analyse de l'activité pour la conception des systèmes de travail. *Activités* 01, 19. [<10.4000/activites.1156>](#)
- Bockstaller, C., Beauchet, S., Manneville, V., Amiaud, B., Botreau, R., 2017. A tool to design fuzzy decision trees for sustainability assessment. *Environmental Modelling & Software* 97, 130-144. [<10.1016/j.envsoft.2017.07.011>](#)
- Bohanec M., 2015. DEXi: Program for Multi-Attribute Decision Making, User's Manual, Version 5.00. IJS Report DP-11897, Jožef Stefan Institute, Ljubljana
- Bornet C., Brangier E., 2013. La méthode des personas : principes, intérêt et limites. *Bulletin de psychologie* 2013/2 524 115-134 [<10.3917/bupsy.524.0115>](#)
- Cerf, M., Jeuffroy, M.-H., Prost, L., Meynard, J.-M., 2012. Participatory design of agricultural decision support tools: taking account of the use situations. *Agronomy for Sustainable Development* 32, 899-910. [<10.1007/s13593-012-0091-z>](#)

Colbach N., Cordeau S., Queyrel W., Maillot T., Villerd J., Moreau D., 2019. Du champ virtuel au champ réel - ou comment utiliser un modèle de simulation pour diagnostiquer des stratégies de gestion durables des adventices ? *Agronomie, Environnement et Sociétés* 9, 111-128 [<aes-9-2-14>](#)

Colas F., Queyrel W., Van Inghelandt B., Villerd J. & Colbach N., 2020. DeciFlorSys : un outil pour accompagner les agriculteurs dans la transition agroécologique. *Innovations Agronomiques* 81, 91-100, [<10.15454/tcsz-9a31>](#)

Craheix, D., Angevin, F., Bergez, J.E., Bockstaller, C., Colomb, B., Guichard, L., Reau, R., Doré, T., 2012b. MASC 2.0, un outil d'évaluation multicritère pour estimer la contribution des systèmes de culture au développement durable. *Innovations Agronomiques* 20, 35-48. [<hal-02265455>](#)

Engeström, Y., 2014. *Learning by Expanding*. 2ème Edition. Cambridge University Press.

Lefeuvre, T., Jeuffroy, M.-H., Meynard, J.-M., Cerf, M., Prost, L., 2020. *Guide pratique : Réaliser un diagnostic des situations d'usage. La conception innovante dans les systèmes agri-alimentaires*. INRAE. [<10.15454/DFD0-F138>](#)



TÉMOIGNAGE

Toolbox for crop diversification : un outil issu du projet DiverImpacts pour identifier des ressources disponibles pour l'évaluation, le suivi et l'accompagnement des trajectoires de diversification

Aline Vandewalle¹ et Marion Des Roseaux²

Avec la collaboration de Bourlet Céline¹, Emmanuel Mérot¹, Mathieu Hirschy², Didier Stilmant³, Raj Chongtham Iman⁴, Loïc Viguière⁵, Christian Bockstaeller⁵, Antoine Messean⁵

¹ Chambre d'agriculture des Pays de la Loire ²ACTA – France ³CRA Wallonie – Belgique

⁴ Swedish University of Agricultural Sciences – Suède

⁵ INRAE – France Email contact auteur : corclement@gmail.com

Résumé

Les freins face à la diversification des assolements ont été caractérisés et couvrent l'ensemble des échelles, de la production à la coordination entre les acteurs des filières. Pour les lever, au cours du processus de diversification, il est indispensable de mobiliser des ressources adaptées aux différentes activités en lien avec la diversification, qu'il s'agisse de mobilisation de références, de sources d'inspiration, d'évaluation...

Afin d'appuyer les utilisateurs dans l'identification de ressources pertinentes, une boîte à outils permettant d'aiguiller les choix des utilisateurs a été constituée. Elle repose sur un modèle DEXI et permet de hiérarchiser les ressources en fonction des attentes exprimées des utilisateurs, à partir d'un questionnaire spécifique. La boîte à outils comprend à ce jour plus de 150 ressources (outils, modèles, documents techniques, vidéos...) et continue d'être alimentée en fonction des ressources produites au sein du projet DiverIMPACTS mais aussi d'autres projets en lien avec la thématique.

Un exemple de mobilisation de l'outil à partir d'un cas d'études de l'Ouest de la France permet d'illustrer son utilisation possible aux différentes phases du processus de diversification.

La TOOLBOX est disponible sur le site web du projet DiverIMPACTS : <https://www.diverimpacts.net/toolbox.html> et sur celui de la Chambre d'agriculture des Pays de la Loire (https://plchambagri.shinyapps.io/toolbox_shiny/)

Abstract

The obstacles to diversification have been characterized and cover all scales, from production to scale, from production to coordination between the various actors. To overcome them during the diversification process, it is essential to mobilize resources adapted to the various resources on diversification, whether in terms of mobilizing references, sources of inspiration, assesment...

To help users identify relevant resources, a toolbox for Crop Diversification has been created to guide them in their choices of the right resource among possibilities. The decision tree underpinning the tool is based on an aggregative DEXI program which compares needs described through a set of questions. The toolbox currently comprises over 150 resources(tools, templates, technical documents, videos....), and continues to be updated with resources produced within the DiverIMPACTS project, as well as other projects related to the thematic.

An example of use of the tool based on a case study from Western France illustrates its potential application at different stages of the diversification process.

The TOOLBOX is available on the DIVERIMPACTS project website : <https://www.diverimpacts.net/toolbox> and to the link: https://plchambagri.shinyapps.io/toolbox_shiny.

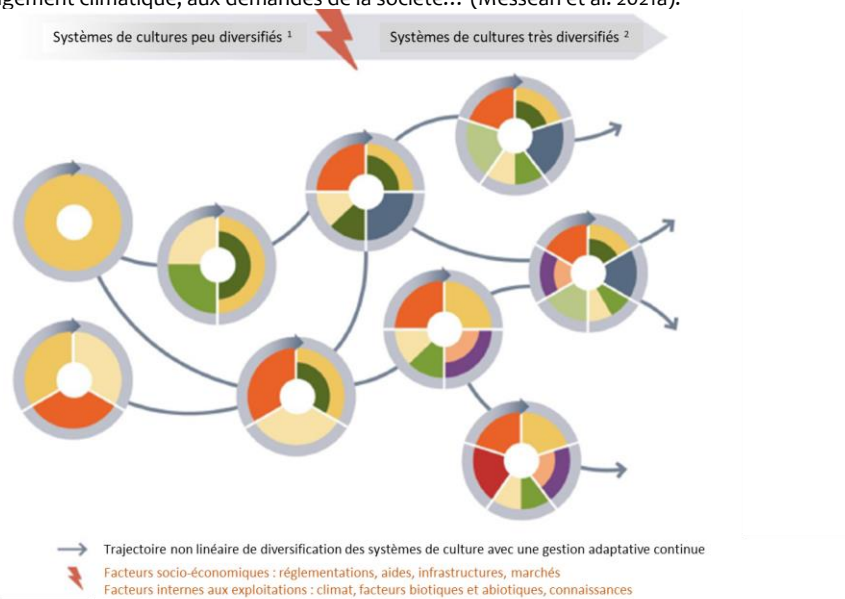
Introduction

Face aux impacts négatifs de la simplification des systèmes de culture sur l'utilisation des ressources, la qualité des sols, le salissement des parcelles, etc..., la diversification des assolements est un levier majeur pour la durabilité de ces systèmes. Elle peut contribuer aux transitions agroécologiques et à l'atteinte des objectifs de développement durable (Nicolétis et al. 2019).

La combinaison de pratiques de diversification telles que (i) l'allongement de la rotation, (ii) les cultures associées (cultures simultanées de 2 cultures ou plus sur une même parcelle), (iii) les cultures multiples (succession de plusieurs cultures de vente sur une même campagne et une même parcelle) et (iv) les cultures intermédiaires multi-services (culture de plantes non récoltées entre 2 cultures de vente, parfois en relai) peut contribuer à améliorer les performances environnementales des systèmes tout en maintenant des performances économiques et sociales satisfaisantes (Viguié et al. 2021).

Cependant, de nombreux freins (techniques, économiques, connaissances, compétences...) existent. Ils ont été caractérisés dans le cadre du projet DiverIMPACTS (2017-2022) et couvrent l'ensemble des maillons des chaînes de valeur : production agricole, récolte, collecte, stockage et distribution, marchés, coordination entre les acteurs des filières (Morel et al. 2020).

Ainsi, la diversification des cultures est un processus complexe et évolutif : les acteurs doivent s'adapter continuellement pour tenir compte de leur environnement et faire évoluer leurs systèmes de cultures. Il n'y a donc pas une seule stratégie de diversification (Figure 3). Chaque exploitation doit s'adapter continuellement à ses propres conditions pédoclimatiques, opportunités de marchés... mais également à des facteurs externes tels que l'adaptation au changement climatique, aux demandes de la société... (Messéan et al. 2021a).



¹ Systèmes de cultures peu diversifiés comprenant une petite gamme de cultures principales appartenant au système dominant

² Systèmes de cultures très diversifiés produisant une large gamme de cultures, ce qui nécessite des chaînes de valeur ad hoc ainsi qu'une coordination et une flexibilité de la part de tous les acteurs.

Figure 3 : illustration de la diversité des stratégies de diversification (d'après Messéan et al. 2021a)

La mise en œuvre de systèmes de cultures diversifiés nécessite donc non seulement le développement d'innovations agronomiques mais également organisationnelles ainsi que des aménagements et innovations systémiques, c'est-à-dire en profondeur, pas seulement à la marge, en amont et en aval des filières (Stilmant et al. 2019 ; Meynard et al. 2018). Cette approche systémique nécessite la mobilisation d'outils et de ressources adaptées pour accompagner les acteurs tout au long des transitions vers des systèmes plus diversifiés (Messéan et al. 2021b).

A l'heure actuelle, de nombreuses ressources et outils ont été créés pour accompagner les différents acteurs (agriculteurs, conseillers, acteurs des filières...), à toutes les échelles (de la parcelle à la filière). Au cours du processus de diversification, il est indispensable de mobiliser des ressources adaptées aux différentes activités en lien avec la diversification, qu'il s'agisse de références, de sources d'inspiration (sous forme de retours d'expériences, de témoignages...), ou encore d'évaluation des performances des systèmes, exploitations, filières...

Le projet européen DiverIMPACTS (Diversification through Rotation, Intercropping, Multiple Cropping, Promoted by Actors and Value Chains towards Sustainability – 2017-2022) a eu pour objectif d'exploiter le potentiel de la diversification des systèmes de culture pour améliorer leur productivité, la production de services écosystémiques, l'efficacité dans l'utilisation des ressources et la durabilité des filières. Après avoir caractérisé les freins à la diversification, il visait à apporter aux agriculteurs la preuve des bénéfices techniques, économiques et sociétaux de la diversification et à fournir aux acteurs du monde rural les innovations techniques et organisationnelles susceptibles de lever les verrous actuels à l'échelle des exploitations agricoles, des filières et des territoires mais également au niveau du système sociotechnique dans son ensemble (politiques agricoles, réglementation, éducation et conseil). Coordonné par INRAE (Antoine Messéan), le consortium comprenait 34 partenaires de 11 pays et couvrait une grande diversité d'acteurs : agriculteurs et organisations agricoles, conseillers, coopératives, scientifiques, industriels, représentants de la société civile et des territoires.

Ce projet a ainsi proposé différents accompagnements, méthodes et outils pour les lever et accélérer la diversification des systèmes. Parmi ces outils, la TOOLBOX (boîte à outils pour la diversification) permet d'identifier et de prioriser les ressources disponibles pour accompagner la diversification.

Le projet DiverIMPACTS s'est appuyé sur les expériences de 25 cas d'études à travers l'Europe, chaque cas d'étude constituant une expérience de diversification en cours de développement, avec une dynamique multi-acteurs et qui a été accompagnée avec des approches de co-innovation durant les 5 années du projet. Chaque cas d'études a mobilisé des outils lui permettant d'identifier les acteurs à mobiliser, de définir un plan d'action, de le mettre en œuvre et de l'évaluer. L'analyse des démarches de co-innovation mises en œuvre dans les différents cas d'études a permis de nourrir la réflexion de l'ensemble des acteurs du projet.

Cet article revient sur l'évolution des besoins au cours des processus de diversification, présente l'outil TOOLBOX, et illustre son utilisation à partir d'un cas d'études du projet DiverIMPACTS. Enfin, l'analyse critique de l'outil permet d'identifier des pistes d'amélioration.

Des besoins des acteurs différents

Dans le cadre du projet DiverIMPACTS, des ateliers ont été organisés avec des agriculteurs, des acteurs des réseaux AKIS (Agricultural Knowledge and Innovation Systems,) et des enseignants de six pays impliqués dans le projet (France, Allemagne, Suède, Pays Bas, Royaume-Uni, Belgique). L'objectif était d'identifier leurs besoins pour faciliter la diversification à leur échelle. Il en ressort des besoins de 3 types : (i) des connaissances techniques et théoriques sur la diversification ; (ii) des moyens (au sens outils et méthodes) pour développer la diversification et transférer les différents concepts ; (iii) la nécessité de prendre en compte les différents maillons de la chaîne de valeur (Baccar, Vandewalle, et Duhamel 2020).

D'autre part, une analyse des 25 cas d'études du projet réalisée par Rossing et al. 2022 a permis de mettre en évidence une diversité d'activités mobilisées par les acteurs de ces cas d'études, variant selon leur avancement, leur plan d'actions et les différentes phases de leur projet. Elles ont été décrites en 11 types d'activités tels que le développement de partenariats, la mobilisation de connaissances ou le lobbying (Figure 4)

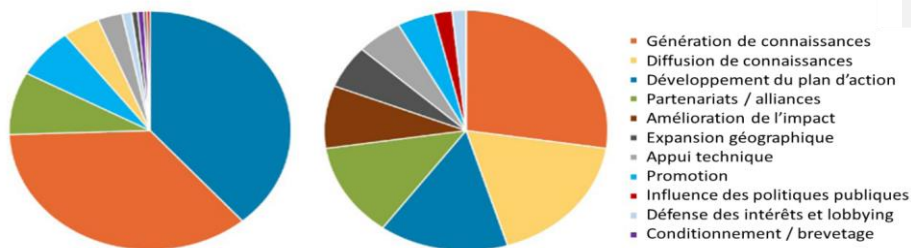


Figure 4 : Types d'activités développées par les Cas d'études DiverIMPACTS : à gauche, il s'agit de la répartition des activités des 25 cas d'études dans les 2 premières années du projet (avec une part importante liée à la définition du plan d'actions, la génération des connaissances) et à droite, il s'agit des activités menées dans la 2^e moitié du projet (avec plus d'activités liées à la diffusion...). On peut ainsi noter à la fois la diversité des types d'activités, et leur évolution dans le temps (d'après Rossing et al. 2022).

L'analyse de ces travaux a été utilisée dans le cadre de la construction de la Toolbox pour caractériser les besoins des futurs utilisateurs et on ainsi permis de construire l'interface de manière adaptée.

Des ressources multiples pour accompagner la diversification

Dès 2018, un premier inventaire des outils d'accompagnement à la diversification a été réalisé par les partenaires du projet (Vandewalle 2019). Il s'est enrichi au fil des années par une veille et les apports du projet DiverIMPACTS ainsi que par ceux des autres projets du cluster européen Diversification des cultures (Crop Diversification Cluster⁷⁶, regroupant 6 projets Recherche Innovation EU Horizon 2020 - Diverfarming, DiverIMPACTS, DIVERSify, LegValue, ReMIX et TRUE). Cet inventaire a permis d'identifier et de décrire l'ensemble des ressources au sein d'un unique document et sur la base de descripteurs communs présentés dans le Tableau 1.

⁷⁶ <https://www.cropdiversification.eu/>

Catégorie	Descripteur	Caractéristiques
Type d'activité	Suivis des pratiques	Outil permettant de capitaliser les pratiques mises en œuvre
	Construction de partenariats	Ressources utiles pour la construction de partenariats
	Exemples et sources d'inspiration	Exemples, témoignages, retours d'expériences
	Consultation de références techniques	Références techniques
	Gestion des stratégies de diversification	Ressources d'aide au choix, pilotage des stratégies de diversification (ex : OAD)
	Diagnostics	Outils de diagnostic (ex IDEA)
	Partage de connaissances	Ressources permettant de partager des connaissances (ex / GECCO)
	Evaluation	Outils d'évaluation (ex / MASC 2.0)
	Conception de systèmes	Outils, méthodes, ressources pour la conception de systèmes (ex : Guide Stephy)
Domaine d'utilisation	Domaine de validité géographique	Zone géographique dans lequel la ressource peut être mobilisée
	Contexte	Utilisable en agriculture conventionnelle, biologique, les 2
	Type de productions	Type des productions pour lesquelles la ressource est pertinente (Grandes cultures et cultures fourragères, Maraichage, Vigne et autres cultures pérennes)
	Échelle	Parcelle / système de cultures, Exploitation, Territoire ou Filière
	Type d'utilisateurs	Profil à même de mobiliser la ressource (plusieurs profils possibles) : Conseiller, Agriculteur, Expert, Chercheur, Acteur de la société civile, Étudiant
	Performances attendues	Types de performances évoquées avec cette ressource (techniques, économiques, environnementales, sociales, multi-performance)
	Stratégies de diversification	Rotation, Cultures associées, Cultures multiples, Mélanges de variétés, Agroforesterie, Couverts végétaux, Cultures fourragères, Cultures en bandes, Cultures mineures, Autres
Informations pratiques	Langue	
	Temps de formation	Inférieur à 1h, entre 1h et 1j, supérieur à 1 jour
	Temps de collecte de données	Inférieur à 1h, entre 1h et 1j, supérieur à 1 jour
	Cout	Gratuit / payant
Autres informations utiles	Descriptif de la ressource	
	Format	Document, outil informatique, vidéo, base de données, site web....
	Lien web	
	Références complémentaires	

Tableau 1: Descriptif des critères de caractérisation des ressources

A ce jour, cet inventaire recense plus de 150 ressources de formats variés : outils d'aide à la décision, outils d'évaluation, modèles, documents techniques, vidéos,... Ces ressources couvrent un large panel d'activités liées à la diversification (évaluation, diagnostic, retour d'expériences, conception, aide à la décision...) et de multiples stratégies de diversification (rotation, cultures associées, cultures multiples, cultures intermédiaires, structuration de filières...) – Figure 3. Malgré la diversité des ressources, tous les aspects de la diversification ne sont pas encore couverts.

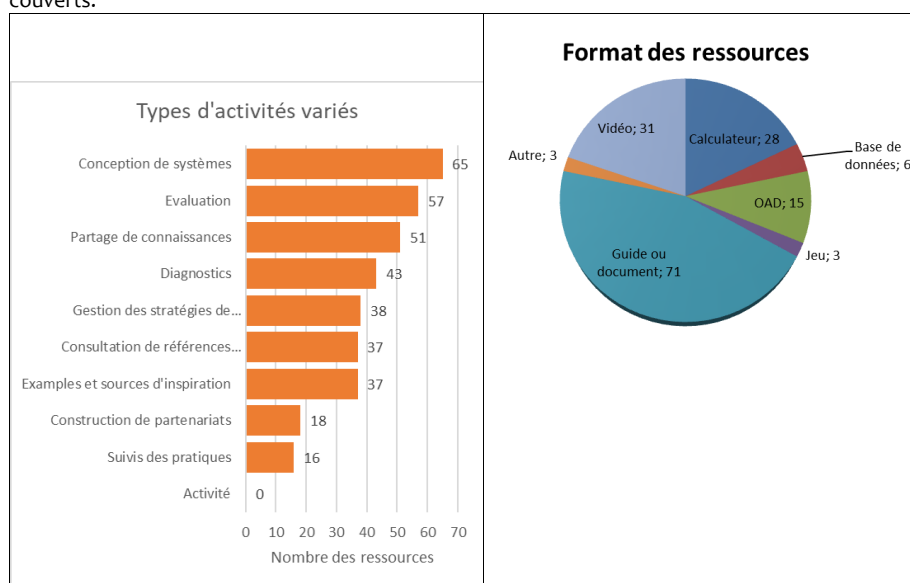


Figure 3 : répartition des ressources identifiées selon le type d'activité permis et le format des ressources

Ce recensement évolue régulièrement. De nouvelles entrées peuvent être ajoutées sur demande (toolbox-diverimpacts@pl.chambagri.fr), pour intégrer des ressources couvrant tout ou partie des sujets en lien avec la diversification.

Création de la ToolBox for Crop diversification

Face à cet ensemble de ressources disponibles, un outil d'aide (Figure 4) a été créé pour naviguer en fonction des besoins des utilisateurs et identifier les plus pertinentes pour eux : la TOOLBOX for Crop Diversification. A partir des besoins exprimés (identifiés à partir d'un questionnaire) et de la liste des ressources disponibles, le modèle DEXI de la TOOLBOX permet de comparer les besoins avec chaque entrée de la base de données et donc de hiérarchiser les ressources en fonction de leur correspondance avec les besoins.

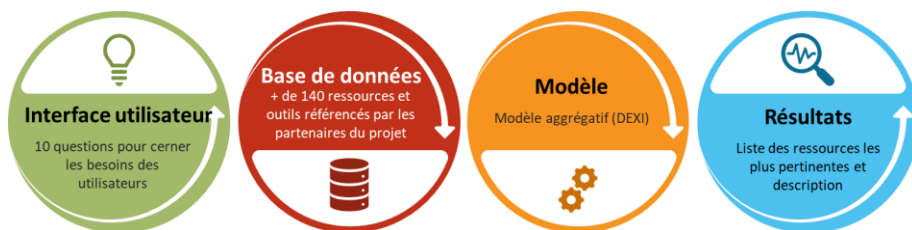


Figure 4 : Schéma conceptuel de la ToolBox for crop Diversification

Choix du modèle agrégatif de hiérarchisation des ressources

Des premiers travaux menés en 2018 par Cappe de Baillon avaient mis en évidence le poids de l'ordre des critères pour discriminer les ressources dans un modèle linéaire basé sur des tris successifs. Face à ce constat, le choix méthodologique s'est porté sur un modèle agrégatif de type DEXI (Bohannec, 2011), permettant en outre d'accorder des poids différents à chaque critère.

Le modèle DEXI ainsi constitué prend en compte 9 critères de base, tels que le type de ressources souhaitées (activités recherchées, intitulées « type of activity », leur format intitulé « type of resources », l'échelle de réflexion intitulée « Scale », les leviers de diversification mobilisés intitulés « type of diversification », la langue (« Accessible languages »), la zone géographique sur laquelle l'outil peut être mobilisé (« Domain of validity »), le contexte de production « context » (en agriculture biologique ou conventionnelle...), le type d'utilisateurs ciblés (« users / target audience »), le type de performances étudiées (technique, économique, multi-performance...) avec « Main outcomes : expected performances ». Ces 9 critères sont agrégés en 3 critères « intermédiaires » : conditions d'applications (« application conditions », approche (pour rendre compte des stratégies de diversification) « Approach » et ressources attendues « expected resources », qui est lui-même un critère agrégé. Le critère racine de l'arbre est nommé « global contribution » (Figure 5).

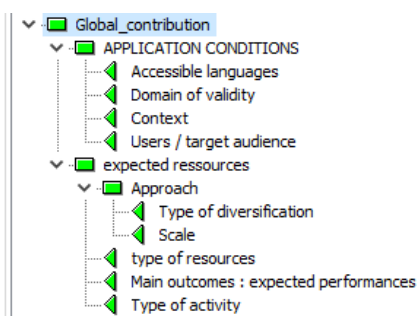


Figure 5 : Structure de l'arbre DEXI

L'objectif attendu de ce modèle est de mettre en avant les ressources répondant au mieux aux activités décrites par l'utilisateur. La structure de l'arbre et les pondérations des différentes branches ont été réalisées manuellement avec les partenaires du projet. Cet arbre a évolué au cours du projet pour tenir compte des résultats des différents travaux de recherche menés (apports méthodologiques issus de l'analyse des travaux des cas d'études notamment).

Une analyse de sensibilité a également permis d'améliorer la sélectivité et la précision des résultats.

La méthodologie de hiérarchisation des ressources présentées amène par exemple à présenter en premier lieu les ressources de type vidéo et document puis les outils en tant que tels, de manière à promouvoir en premier lieu des approches génériques (exemple webinaire de présentation d'un panel d'indicateurs de performances de la diversification mis au point dans le cadre du projet DiverIMPACTS) ou une liste d'outils, de critères et indicateurs pour évaluer les performances de la diversification.

Interface utilisateur

L'interface utilisateur d'accueil repose sur 10 questions simples (profil de l'utilisateur, langue(s) parlée(s), pays et région d'origine, échelle spatiale à considérer, type de systèmes et de filières à considérer, types de performances des systèmes attendues, type(s) d'activités recherchées, stratégies de diversification à considérer, format des ressources recherchées). Elle permet de cerner les besoins de l'utilisateur. La page de présentation des résultats met en avant un nombre restreint de ressources avec pour chacune d'entre elles : une description, un lien pour retrouver cette ressource, un graphique pour visualiser l'adéquation avec les besoins exprimés. Des filtres complémentaires sur les aspects pratiques (payant / gratuit, besoins en formation, ...) permettent d'affiner la recherche (Figure 7).

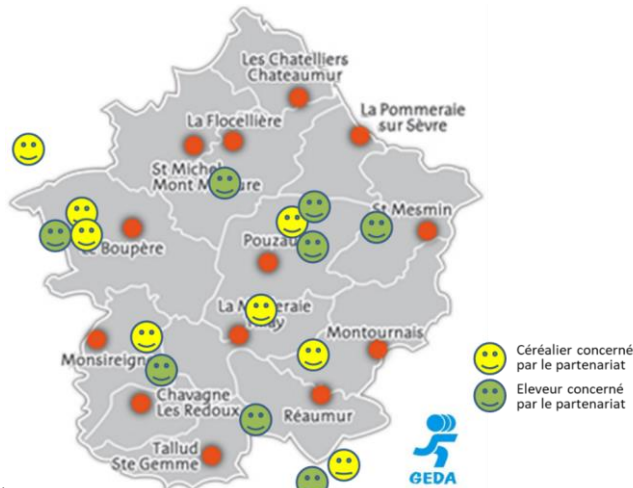
Les utilisateurs peuvent définir très précisément leurs besoins (exemple : en choisissant des caractéristiques pour chaque critère) ou bien rester plus vague dans ces choix. Les propositions de ressources seront ainsi plus nombreuses et diverses.

L'amélioration de cette interface a été permise par une session collective de test réalisée par l'ensemble des partenaires du projet DiverIMPACTS, qui se sont placés comme « utilisateurs potentiels » de l'outil.

L'application TOOLBOX for crop diversification a été développée dans le programme R avec le package Shiny (Chang et al. 2023). Elle se présente sous la forme d'une application web disponible sur le site du projet DiverIMPACTS (<https://www.diverimpacts.net/toolbox>) et sur celui de la Chambre d'agriculture des Pays de la Loire.

Un exemple d'utilisation avec le cas d'étude Diverimpacts 11 (partenariat entre céréaliers et éleveurs pour favoriser la diversification)

Face aux constats faits localement par des agriculteurs vendéens de (i) un besoin de diversification pour des céréaliers, et de valorisation de parcelles éloignées de l'exploitation et (ii) un besoin de fourrages de qualité pour des éleveurs souhaitant réduire leur dépendance aux achats, une dizaine d'entre eux, accompagnés par la Chambre d'agriculture des Pays de la Loire, a décidé de travailler ensemble au développement de partenariats entre céréaliers et éleveurs. Les bénéfices attendus pour les céréaliers sont l'introduction d'une nouvelle culture (généralement à base de légumineuses) pour faire face à des problématiques de salissement ou réduire l'utilisation d'intrants de synthèse. Les éleveurs souhaitent quant à eux une production de fourrages complémentaire.



Carte du CS11

Figure 6 Carte des partenariats entre céréaliers et éleveurs initiés dans le cadre du Cas d'études DIVERIMPACTS 11 (Case studies 11)

Différents types d'activités (voir Tableau 1) ont été menés par l'équipe du CS11 (Case Study 11 du projet DiverIMPACTS) depuis 2016, retranscrites via l'outil « learning history » (Leclère, Rouillon, et Nonis 2023) : développement de partenariats (agriculteurs, acteurs locaux...), mobilisation de connaissances (sur les légumineuses à graines, les couverts à base de légumineuses, les associations, ...), assistance technique aux agriculteurs (appui technique, préparation des futurs partenariats concrets entre producteurs), évaluation des systèmes (à l'échelle de l'exploitation mais également du petit territoire), co-conception de systèmes adaptés au changement climatique, diffusion de connaissances (via l'organisation de plateformes de cultures de diversification, de visites...), retours d'expériences (pour promouvoir des modèles innovants...).

Pour mettre en place certaines de ces activités, l'outil TOOLBOX for crop diversification peut être utile pour identifier des ressources à mobiliser, ici par les conseillers en charge de l'animation du CS :

- **Mobilisation de connaissances techniques** : dans cet exemple, de nombreuses ressources sont proposées par la toolbox suite au choix de l'utilisateur dans le questionnaire (guides techniques, outils d'aides à la décision, ...). Celles-ci ne couvrent pas que la région identifiée (ici Pays de la Loire) mais également d'autres régions de manière à bénéficier également de références plus larges (sous réserve d'un contexte pédo-climatique proche) (Figure 7)

La Toolbox a été identifiée pour vous une sélection d'outils et ressources, détaillés ci-dessous par nom, format et description. Pour en savoir plus sur un outil ou une ressource précise, vous pouvez cliquer sur le bouton (Détails). Le radar généré détaille avec quelle précision l'outil sélectionné répond aux critères que vous avez sélectionnés.

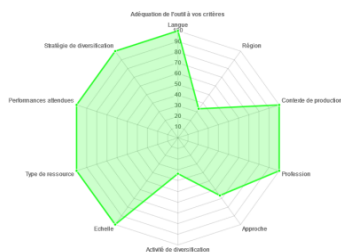
Nom de la ressource	Format	En quelques mots	Plus de détails
Service/catch crop issues from three Case Studies	Webinar		DÉTAILS
Synergies between Field Experiments and Case Studies	Webinar		DÉTAILS
AgroDiversity Toolbox		A wiki tool, an interactive user-fed knowledge source of regionally relevant information about complementary means to diversify agricultural systems.	DÉTAILS
Increasing awareness of soil microbial ecosystem services	Practice abstract		DÉTAILS
From theory to practice of species mixtures		Document to promote the sharing of knowledge on species mixtures (a study of the feasibility of harvesting and sorting + 52 technical sheets from farmers' experiences).	DÉTAILS
De la théorie à la mise en pratique des mélanges d'espèces		Document pour favoriser le partage au plus grand nombre des connaissances sur les cultures associées (étude de faisabilité de la récolte et du tri + 52 fiches techniques issues d'expériences d'agriculteurs).	DÉTAILS
GECCO		Collaborative web platform with a knowledge base (datasheets) and a forum.	DÉTAILS
Prototype of EcosystemDX		Web-based interactive platform, compilation of information on crop mixtures available in scientific literature and empirical experimentations.	DÉTAILS
OSCAR Subsidary Crop database		Database with the results of screening programmes (OSCAR and others), mainly with information on less familiar species.	DÉTAILS
CAPS		Tool to synthesize existing knowledge on the practices of combining winter rageseed with service plants.	DÉTAILS

Previous 1 Next

From theory to practice of species mixtures

This document, whose content is widely disseminated in different formats (including a wiki), aims to promote the sharing of knowledge on species mixtures through: i) the presentation of the ReNEX project; ii) information on the functioning and performance of the mixtures; iii) the perception of stakeholders and the diversity of practices implemented; iv) technical sheets from farmers' experiences to facilitate the implementation of species mixtures, and finally v) insights on the issue of feasibility of harvesting and sorting.

Available soon



Votre profil **Echelle à considérer**

Conseiller/Technicien Parcelle

Vous parlez

Anglais Français

Votre pays

FRANCE

Soyez plus précis en sélectionnant votre région

Votre région

Pays de la Loire

Intérêt pour l'agriculture conventionnelle, biologique ou les deux ?

Tous

Type de performances attendues

Performance agronomique

Vous cherchez un outil afin de :


Evaluation
 Références techniques
 Conception de stratégies de diversification
 Diagnostic, identification des objectifs
 Diagnostic des dynamiques multi-acteurs
 Simulation, prospective
 Création de connaissances, transfert des résultats de la recherche
 Initer des partenariats
 Suivi des pratiques
 Aide à la décision
 Sources d'inspiration

Stratégies de diversification

Agroforesterie
 Couverts végétaux
 Création d'une filière
 Mélanges variétaux
 Association de cultures
 Cultures multiples
 Rotation
 Cultures à destination alimentation animale
 Cultures en bandes
 Cultures mineures
 Autres pratiques
 Toutes stratégies de diversification

Format de l'outil

Calculateur
 Base de données
 Outil d'aide à la décision
 Jeu
 Guide ou document
 Vidéo
 Tout type d'outil

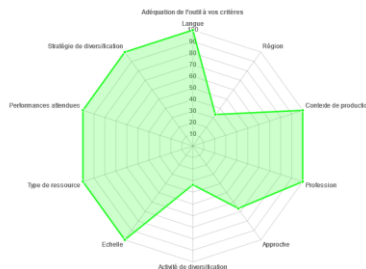
 This project has received funding from the European Union's Horizon 2020 research and innovation programme under grant agreement No 727462 (DiverIMPACTS)

La Toolbox a identifié pour vous une sélection d'outils et ressources, détaillés ci-dessous par nom, format et description. Pour en savoir plus sur un outil ou une ressource précisée, vous pouvez cliquer sur le bouton (Détails). Le radar généré détaille avec quelle précision l'outil sélectionné répond aux critères que vous avez sélectionnés.

From theory to practice of species mixtures

This document, whose content is widely disseminated in different formats (including a wiki), aims to promote the sharing of knowledge on species mixtures through: i) the presentation of the BHMIX project; ii) information on the functioning and performance of the mixtures; iii) the perception of stakeholders and the diversity of practices implemented; iv) technical sheets from farmers' experiences to facilitate the implementation of species mixtures, and finally v) insights on the issue of feasibility of harvesting and sorting.

Available soon



Nom de la ressource	Format	En quelques mots	Plus de détails
Service/atch crop issues from three Case Studies	Webinar		DÉTAILS
Synergies between Field Experiments and Case Studies	Webinar		DÉTAILS
AgroDiversity ToolBox		A wiki tool, an interactive user-fed knowledge source of regionally relevant information about complementary means to diversify agricultural systems.	DÉTAILS
Increasing awareness of soil microbial ecosystem services	Practice abstract		DÉTAILS
From theory to practice of species mixtures		Document to promote the sharing of knowledge on species mixtures (a study of the feasibility of harvesting and sorting + 52 technical sheets from farmers' experiences).	DÉTAILS
De la théorie à la mise en pratique des mélanges d'espèces		Document pour favoriser le partage au plus grand nombre des connaissances sur les cultures associées (étude de faisabilité de la récolte et du tri + 52 fiches techniques issues d'expériences d'agriculteurs).	DÉTAILS
GECO		Collaborative web platform with a knowledge base (datasheets) and a forum.	DÉTAILS
Prototype of EcosystemIX		Web-based interactive platform, compilation of information on crop mixtures available in scientific literature and empirical experimentalations.	DÉTAILS
OSCAR Subsidiary Crop database		Database with the results of screening programmes (OSCAR and others), mainly with information on less familiar species.	DÉTAILS
CAPS		Tool to synthesise existing knowledge on the practices of combining winter rapeseed with service plants.	DÉTAILS

Previous Next

Figure 7 : Copies d'écran de la recherche pour l'identification de ressources techniques pour le CS11

- **Evaluation des systèmes** : dans cet exemple, l'évaluation multicritère des performances à l'échelle de l'exploitation est ciblée par l'utilisateur, étape importante dans le CS pour évaluer l'intérêt pour les agriculteurs céréaliers de réaliser des partenariats avec leurs voisins éleveurs (Figure 8) Figure 8. Dans cet exemple, il est par exemple proposé, entre autres, d'approfondir le choix des indicateurs avec le panel d'indicateurs mis au point au sein du projet DiverIMPACTS pour évaluer la multi-performance de stratégies de diversification.

Votre profil ?
 Conseiller/Technicien

Vous parlez ?
 Anglais Français

Votre pays
 FRANCE

Soyez plus précis en sélectionnant votre région

Echelle à considérer
 Exploitation

Intérêt pour l'agriculture conventionnelle, biologique ou les deux ?
 Agriculture conventionnelle

Type de performances attendues
 Multi-performance

Vous cherchez un outil afin de : ?

- Evaluation
- Références techniques
- Conception de stratégies de diversification
- Diagnostic, identification des objectifs
- Diagnostic des dynamiques multi-acteurs
- Simulation, prospective
- Création de connaissances, transfert des résultats de la recherche
- Initier des partenariats
- Suivi des pratiques
- Aide à la décision
- Sources d'inspiration

Stratégies de diversification ?

- Agroforesterie
- Couverts végétaux
- Création d'une filière
- Mélanges variétaux
- Association de cultures
- Cultures multiples
- Rotation
- Cultures à destination alimentation animale
- Cultures en bandes
- Cultures mineures
- Autres pratiques
- Toutes stratégies de diversification

Format de l'outil ?

- Calculateur
- Base de données
- Outil d'aide à la décision
- Jeu
- Guide ou document
- Vidéo
- Tout type d'outil

APPLIQUER

RÉ-INITIALISER



La Toolbox a été créée pour vous aider à sélectionner d'outils et ressources, disponibles en français, anglais ou allemand.

Pour en savoir plus sur un outil ou une ressource précise, vous pouvez cliquer sur le bouton (Détails). Le radar généralisé indique avec quelle précision l'outil sélectionné répond aux critères que vous avez sélectionnés.

Performance Indicators

Paul Verhove will discuss performance indicators in the seminar. Paul will tell us about the different ways in which performance indicators can be used (in past, or also based on try-outs with case study farms in the DiverIMPACTS project).

<https://www.diverimpacts.net/services/how-to-use-seminar-performance-indicators.html>

Figure 8 : Copies d'écran de la recherche pour l'identification de ressources autour de l'évaluation des performances pour le CS11

Les exemples cités ci-dessous ont été mis en œuvre avant la finalisation de la Toolbox et donc l'outil n'a pas pu être utilisé pour ce cas spécifique.

Focus sur quelques ressources pour l'évaluation, le suivi et l'accompagnement des trajectoires de diversification

La démarche d'évaluation des performances de systèmes diversifiés s'accompagne comme toute démarche d'évaluation de questions et diagnostic préliminaires qui doivent guider le choix d'un ensemble d'indicateurs et/ou d'une méthode d'évaluation (Bockstaller, Feschet, et Angevin 2015). Le choix d'indicateurs ou d'outils d'évaluation doit être raisonné en premier lieu en fonction des attentes, des besoins et des moyens de l'utilisateur. La TOOLBOX ne permet pas d'aller finement dans ces réflexions mais permet une première identification d'outils existants (voir exemple CS11 évaluation à l'échelle de l'exploitation = 7 outils identifiés) et propose également plusieurs ressources génériques permettant d'identifier les indicateurs pertinents pour évaluer les trajectoires de diversification dont le set d'indicateurs mis au point dans le projet DiverIMPACTS (WP4 2018), ou encore un outil créé pour aider à la sélection d'indicateurs (Canali et al. 2022).

Discussion et Conclusion

Un outil de plus dans un environnement déjà riche ?

Face la multiplicité des outils déjà existants, développés dans le cadre de projets européens ou nationaux, on peut se poser la question de l'intérêt d'un tel outil dans le paysage. Du fait de sa simplicité d'utilisation et de présentation des résultats, il a pour vocation d'être une porte d'entrée pour l'identification de ressources pertinentes répondant aux différents enjeux et étapes du processus de diversification. Du fait de la diversité des trajectoires de diversification et de la nécessité d'adaptation à chaque situation (Messéan et al. 2021a), l'outil n'a pas pour vocation d'apporter une réponse unique aux questions posées.

Un outil adapté à la question de la diversification

L'une des caractéristiques fortes de l'outil est de traiter spécifiquement des questions de diversification, non seulement par les ressources proposées mais aussi par les questions posées dans l'interface. Ces questions ont pour objectif de pouvoir balayer à la fois les différentes stratégies de diversification mais aussi les types d'activités à mettre en œuvre pour faire avancer un processus de diversification. Cette interface « spécialisée » dans la diversification doit permettre aux utilisateurs d'embrasser un large panel de ressources à mobiliser tout au long du processus de diversification.

Maintenance de l'outil et actualisation des ressources

Cet outil a été développé dans le cadre du projet européen DiverIMPACTS à partir des connaissances acquises dans des projets antérieurs et en cours. Pour assurer une pérennisation de l'outil et amplifier son déploiement, la question de sa maintenance et de l'actualisation des ressources associées est au cœur de la réflexion depuis sa conception. La souplesse et l'autonomie dans le développement de l'outil (via le programme R) facilite la maintenance. L'hébergement de l'outil sur le web est facilité par des partenariats, notamment avec le GIS Grandes Cultures. L'ajout de nouvelles ressources dans la base de données est certainement le point le plus délicat car il nécessite une veille et une évaluation continue de nouvelles ressources. A ce jour, la Chambre d'agriculture des Pays de la Loire a mis en place une actualisation bisannuelle de la base de données, se basant sur la veille bibliographique interne sur les acquis de projets européens et nationaux sur la thématique et les ressources collectées via l'outil (adresse mail dédiée: toolbox-diverimpacts@pl.chambagri.fr). Les travaux engagés dans le cadre du groupe thématique diversification du GIS Grandes Cultures permettront d'améliorer ce point.

Une ressource utile mais pas suffisante pour favoriser la diversification

Comme présenté précédemment, l'outil Toolbox for crop diversification ne propose pas de solutions prêtes à l'emploi pour engager des processus de diversification mais plutôt des outils et ressources à mobiliser pour construire, évaluer et piloter les trajectoires de diversification. Pour cela, les différents acteurs impliqués ont besoin d'acquérir de nouvelles compétences, savoir-faire et savoir-être pour mobiliser ces ressources, et agir avec différents acteurs des filières et des territoires (Baccar et al. 2022). L'accompagnement et la formation pour acquérir ces nouvelles compétences sont indispensables et complémentaires à la mobilisation d'outils tels que la ToolBox for Crop diversification.

En conclusion, face à la diversité des stratégies de diversification, des acteurs impliqués et des processus mis en œuvre, on observe une multiplicité d'outils et de ressources mobilisables. Il s'agit pour les acteurs accompagnant ces processus de se repérer et faire des choix à bon escient pour mobiliser des ressources adaptées à chaque cas d'utilisation et à chaque étape du processus. La clé de la réussite de l'outil « ToolBox for crop diversification » sera dans sa mise à jour et son déploiement large de manière à en faire un outil à mobiliser à différentes phases du processus de

diversification de manière à prendre en compte les acquis récents des différents travaux de recherche sur le sujet.

Remerciements :

Nous tenons à remercier l'ensemble des partenaires du projet DiverIMPACTS et plus particulièrement son pilote Antoine Messéan (INRAe) ainsi que les partenaires impliqués directement dans la tâche relative à la création de cette boîte à outils. Ce projet a bénéficié du soutien financier de l'Union Européenne dans le cadre de l'appel à projet H2020- RUR-06-2016 - Crop diversification systems for the delivery of food, feed, industrial products and ecosystems services - from farm benefits to value-chain organisation, sous le **Grant agreement** No 727482.

Bibliographie

- Baccar, Rim, Aline Vandewalle, Hauke Ahnemann, Katie Bliss, Marian Blom, Iman Raj Chongtham, Lieven Delanote, Walter Rossing, Loïc Viguier, et Antoine Messéan. 2022. « Increasing crop diversification requires diversity in teaching, training and learning ». Zenodo. <https://doi.org/10.5281/zenodo.6801262>.
- Baccar, Rim, Aline Vandewalle, et Sophie Duhamel. 2020. « Needs for Training and Advisory as Well as for Formal Education - Deliverable 6.3 », septembre. <https://doi.org/10.5281/zenodo.4478544>.
- Bockstaller, Christian, Pauline Feschet, et Frédérique Angevin. 2015. « Issues in Evaluating Sustainability of Farming Systems with Indicators ». *Oléagineux, Corps Gras, Lipides* 22 (1): 1. <https://doi.org/10.1051/oc/2014052>.
- Bohanec, M. 2011. « DEXi: program for multi-attribute decision making, Version 3.02. » Jozef Stefan Institute, Ljubljana. <http://www.ai.ijs.si/MarkoBohanec/dexi.html>.
- Canali, S., Iocola, I., Vanino, S., & Farina, R. (2022). Tool for the selection of indicators for agriculture sustainability assessment [Data set]. Zenodo. <https://doi.org/10.5281/zenodo.6141022>
- Chang, W, J Cheng, J Allaire, C Sievert, B Schloerke, J McPherson, A Dipert, et B Borges. 2023. Review of *Shiny: Web Application Framework for R. R package version 1.7.4.9002*, par Xie Y et J Allen. <https://shiny.rstudio.com/>.
- Leclère, Margot, Clotilde Rouillon, et Romane Nonis. 2023. « DiverIMPACTS : un guide pratique pour accompagner la conduite du changement ». <https://www.arvalis.fr/file-download/download/public/212846>.
- Messéan, Antoine, Loïc Viguier, Lise Paresys, et Didier Stilmant. 2021a. « Promoting crop diversification for more sustainable agri-food systems: DiverIMPACTS policy brief ». Zenodo. <https://doi.org/10.5281/zenodo.5026587>.
- . 2021b. « Promoting crop diversification for more sustainable agri-food systems: DiverIMPACTS policy brief ». Zenodo. <https://zenodo.org/record/5957276>.
- Meynard, Jean-Marc, François Charrier, M'hand Fares, Marianne Le Bail, Marie-Benoît Magrini, Aude Charlier, et Antoine Messéan. 2018. « Socio-Technical Lock-in Hinders Crop Diversification in France ». *Agronomy for Sustainable Development* 38 (5): 54. <https://doi.org/10.1007/s13593-018-0535-1>.
- Morel, Kevin, Eva Revoyron, Magali San Cristobal, et Philippe V. Baret. 2020. « Innovating within or Outside Dominant Food Systems? Different Challenges for Contrasting Crop Diversification Strategies in Europe », mars. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0229910>.
- Rossing, Walter, Luca Colombo, Barbara Koole, et Antoine Messéan. 2022. « Producing Actionable

Knowledge for Crop Diversification ». Zenodo. <https://doi.org/10.5281/zenodo.6353589>.

- Stilmant, Didier, Frédéric Vanwindekens, Dóra Drexler, Kevin Morel, Eva Revoyron, Walter Rossing, Luca Colombo, et Antoine Messéan. 2019. « Diversification des systèmes de cultures : les défis », janvier. <https://doi.org/10.5281/zenodo.2577846>.
- Surleau-Chambenoit, C, A Morin, M-B Galan, M Cariolle, C Leclercq, Laurence Guichard, et Christian C Bockstaller. 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 ».
- Vandewalle, Aline. 2019. « Inventory of Tools for Crop Diversification Available for Farmers and Advisors - Deliverable 6.1 », février. <https://zenodo.org/record/3967578>.
- Viguié, Loïc, Nicolas Cavan, Christian Bockstaller, Stéphane Cadoux, Guénaëlle Corre-Hellou, Sophie Dubois, Rémy Duval, et al. 2021. « Combining Diversification Practices to Enhance the Sustainability of Conventional Cropping Systems ». *European Journal of Agronomy* 127 (juillet): 126279. <https://doi.org/10.1016/j.eja.2021.126279>.
- WP4, DiverIMPACTS. 2018. « List of the identified criteria and indicators to evaluate crop diversification sustainability and performance », décembre. <https://doi.org/10.5281/zenodo.2354005>.



ARTICLE

Une démarche collective pour gérer l'azote par objectifs de résultats : le projet GAZELLE

Marion Delesalle¹, Justine Chauvin¹, Aïcha Ronceux¹, Marie-Hélène Jeuffroy²

¹ Agro-Transfert Ressources et Territoires, 80200 Estrées-Mons

² INRAE – UMR Agronomie – Campus Agro Paris-Saclay, 91120 Palaiseau

Email contact auteurs : m.delesalle@agro-transfert-rt.org

Résumé

Le projet GAZELLE vise à concevoir une démarche d'accompagnement des agriculteurs pour améliorer le volet nitrate de la qualité de l'eau, et plus largement la gestion de l'azote des exploitations agricoles dans la région des Hauts-de-France, à travers un raisonnement orienté vers des objectifs de résultats. Cette démarche mobilise des référentiels et des indicateurs de suivi, adaptables aux agriculteurs mobilisés et à leur territoire, et structurés sous forme de tableau de bord. Elle est actuellement expérimentée sur quatre groupes d'agriculteurs pilotes dans la région des Hauts-de-France. Cette démarche d'accompagnement est associée à une boîte à outils d'animation, facilitant le déploiement de chaque étape pour l'animateur. Applicable à d'autres thématiques, elle est fondée sur un raisonnement plus fédérateur, plus motivant, plus souple et plus approprié pour atteindre effectivement les résultats attendus sur un territoire.

Mots-clés : accompagnement ; tableau de bord ; qualité de l'eau ; références locales ; Hauts-de-France

Abstract

A collective approach to managing nitrogen towards results objectives : the GAZELLE project

The GAZELLE project aims to design an approach to support farmers to improve water quality, for nitrate issue and more broadly the management of nitrogen on farms in the Hauts-de-France region, through reasoning result-oriented activities. This approach uses references and monitoring indicators, adaptable to the farmers involved and their territory, and structured in the form of a dashboard. It is currently tested on four groups of pilot farmers in the Hauts-de-France region. This support approach is associated with an animation toolbox, making it easier for the facilitator to deploy each step. Applicable to other themes, it is based on a more unifying, more motivating, more flexible and more appropriate reasoning to actually achieve the expected results in a territory.

Introduction

Malgré les moyens mobilisés par la profession agricole pour améliorer la qualité de l'eau en Hauts-de-France depuis le lancement de la directive Nitrates (décembre 1991), les concentrations en nitrate restent problématiques (AESN, 2022; Comité de Bassin Artois Picardie, 2016). En effet, sur les 35 masses d'eau souterraine régionales, 25 sont en mauvais état chimique dont 14 ont été déclassées à cause des nitrates (DREAL, 2018). Les problématiques de pollutions azotées perdurent sur le territoire malgré les applications de la directive nitrate (quasi-totalité du territoire en zone vulnérable). Des pistes d'amélioration sont donc à identifier pour atteindre les résultats attendus sur la qualité de l'eau.

Les mesures déjà mises en place reposent principalement sur une obligation de moyens, plus simples à contrôler. Néanmoins, ces obligations ne permettent pas de s'adapter à la diversité des systèmes de production, des situations culturelles et pédologiques des exploitations agricoles. Par

ailleurs, elles brident les agriculteurs dans leur capacité à innover, entre autres, car elles limitent les possibilités de diversifier leurs pratiques. Plusieurs initiatives et projets ont expérimenté un changement de logique pour améliorer la qualité de l'eau, orienté vers des objectifs de résultats à atteindre (Barataud et al., 2014 ; Ferrané et al., 2020 ; Morel, 2020). L'accompagnement sur la base d'un objectif de résultats permet à l'agriculteur de trouver la stratégie qui correspond le mieux à son système de production, à son pédoclimat, à ses projets. Ces retours d'expériences ont pu mettre en évidence certaines clés de réussite : (1) un engagement des agriculteurs et autres parties prenantes sur le temps long pour obtenir des résultats positifs ; (2) un engagement volontaire de ces acteurs dans ces démarches ; (3) la souplesse et l'adaptation de la démarche aux spécificités du groupe ; (4) une échelle d'action restreinte (locale, Aires d'Alimentation de Captages (AAC) par ex.) est plus favorable à la mobilisation des agriculteurs qu'une échelle large (régionale par ex.). Ces retours d'expérience ont également mis en exergue certains points faibles : (1) le manque de ressources concrètes pour aider les animateurs à mettre en œuvre de telles démarches ; (2) ces démarches sont chronophages, notamment pour l'animateur ; (3) le besoin d'être innovant et motivant sur le temps long pour maintenir la mobilisation des agriculteurs. De plus, la phase de concertation lors de l'élaboration du 6^{ème} Programme d'Action Régional (PAR)⁷⁷ de la « Directive Nitrates » a mis en évidence le besoin d'associer au volet réglementaire existant un volet accompagnement, qui marque une prise de conscience partagée sur la nécessité d'un meilleur accompagnement des agriculteurs vers cet objectif d'améliorer la qualité de l'eau.

Par ailleurs, une enquête réalisée en 2020 auprès d'une diversité d'acteurs agricoles en Hauts-de-France a souligné un manque de connaissances sur les processus de pertes azotées, chez les agriculteurs comme chez les acteurs du développement agricole (Delesalle, 2021). Ces acteurs mentionnent une volonté d'améliorer leurs connaissances sur ces pertes azotées, à travers notamment l'acquisition de références plus contextualisées aux systèmes de culture (SdC) et aux types de sol régionaux (notion de référentiel local). D'autre part, les formes de conseil prodigué par les animateurs et acteurs de l'accompagnement rencontrés sont principalement individuelles, alors qu'une volonté manifeste de partage entre pairs et d'actions plus collectives et locales a été soulignée par les agriculteurs et conseillers, la participation à ces groupes d'échanges favorisant le changement de pratiques et la montée en compétences (Cnudde, 2021). Enfin, passer d'une logique de moyens à une logique de résultats fait l'unanimité auprès des acteurs rencontrés (fatigue face aux nombreuses mesures réglementaires, plus de cohérence vis-à-vis des systèmes de production, etc). Cette logique nécessite néanmoins d'acquérir des connaissances solides sur les facteurs influençant les résultats visés (Cerf et al., 2019 ; Ferrané et al., 2020 ; Paravano et al., 2016 ; Quinio et al., 2021).

Ces éléments ont conduit plusieurs structures de R&D agricole en Hauts-de-France à se réunir autour d'un projet piloté par Agro-Transfert RT pour expérimenter ce changement de logique orienté vers des objectifs de résultats afin d'accompagner le changement de pratiques agricoles nécessaire à l'amélioration de la qualité de l'eau, et plus largement la gestion de l'azote en Hauts-de-France. Le projet GAZELLE⁷⁸ (Gestion de l'AZote par objectifs de rEsultats, dont l'azote potentiellement Lessivable) vise ainsi à acquérir des références et proposer, en la mettant en œuvre, une démarche collective et des outils pour accompagner les acteurs régionaux vers une meilleure gestion de l'azote à partir d'objectifs de résultats à atteindre. Cet article présente la démarche d'accompagnement conçue, déployée et testée pendant trois ans (2022-2024) auprès de quatre groupes pilotes, pour s'assurer de sa pertinence et de son efficacité, en vue de l'améliorer et de la déployer plus largement.

⁷⁷ <https://www.hauts-de-france.developpement-durable.gouv.fr/?6eme-programme-d-actions-de-la-directive-nitrates-en-Hauts-de-France>

⁷⁸ Projet piloté par Agro-Transfert RT, en partenariat avec les chambres d'agriculture des Hauts-de-France, l'INRAE, JUNIA ISA, le LDAR, l'APEF et l'ITB, et financé par l'Agence de l'eau Artois Picardie, l'Agence de l'eau Seine Normandie, la DREAL et la Région Hauts-de-France : <http://www.agro-transfert-rt.org/projets/gazelle/>

Une démarche d'accompagnement adaptée aux spécificités de chaque groupe

La démarche d'accompagnement s'inspire de travaux sur la conception collective et les processus participatifs (Gisclard et al., 2015 ; Luyet et al., 2012 ; Reau et al., 2012, 2018) ainsi que de retours d'expérience sur la mobilisation d'agriculteurs en collectifs (projet Auto'N, Guillier et al., 2020 ; projet ABC'Terre, Leclercq et al., 2021). Elle est donc construite pour être mise en œuvre pour des agriculteurs individuels, organisés en collectifs. C'est une démarche innovante et motivante permettant un accompagnement structuré des agriculteurs en tenant compte de leur propre situation. Elle s'inspire de la gestion dynamique des AAC (Ferrané et al., 2020) qui a pu tester l'accompagnement à partir d'une logique de résultats pour améliorer la qualité de l'eau sur les AAC. La démarche d'accompagnement proposée dans le projet GAZELLE se structure en 4 étapes (Figure 5) : (1) caractérisation agroenvironnementale et sociotechnique du territoire (vis-à-vis de cette démarche innovante) en plus d'un diagnostic des pertes azotées sur une sélection de parcelles des agriculteurs suivis, partagé et analysé collectivement avec eux ; (2) construction collective d'un « projet de groupe » mettant en évidence les objectifs de résultats visés et explorant les leviers d'action à tester ; (3) structuration de ce projet de groupe sous forme d'un tableau de bord pour suivre et adapter l'évolution des actions et des résultats obtenus ; (4) observations et prélèvements au champ, intervention d'experts et ateliers d'échanges autour des résultats observés, base de l'évolution des pratiques en vue de l'atteinte du résultat.

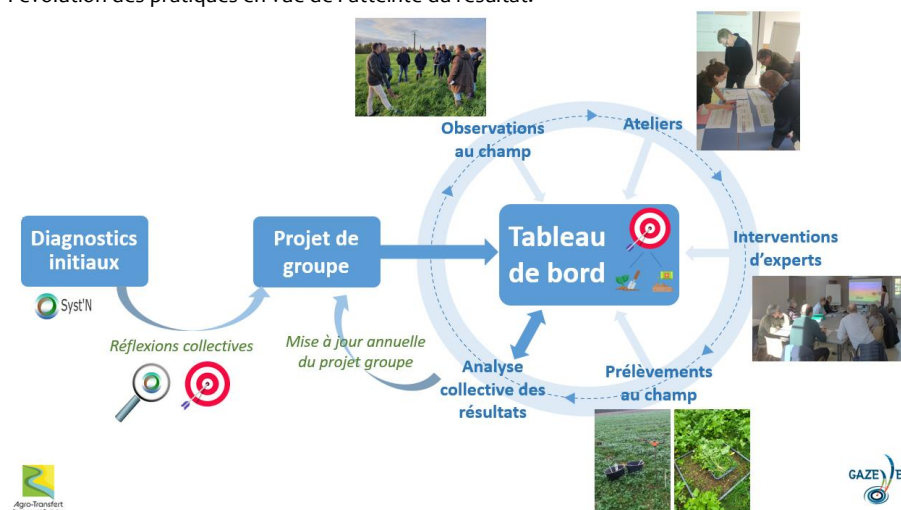


Figure 5 : Schéma de la démarche d'accompagnement proposée dans le projet GAZELLE

Cette démarche a été pensée pour fournir un cadre suffisamment souple pour s'appliquer à tout type de territoires, de systèmes de production, de pédoclimats et d'acteurs. Pour tester cette adaptativité, elle est actuellement mise à l'épreuve auprès de quatre groupes d'agriculteurs pilotes répartis dans la région des Hauts-de-France, dans le cadre du projet GAZELLE (Figure 6).

Figure 6 : Carte des groupes pilotes du projet GAZELLE



Les quatre groupes ont été choisis par les partenaires du projet de

manière à couvrir une diversité de caractéristiques agricoles et pédologiques, vis-à-vis de la qualité de l'eau, du profil des agriculteurs comme des animateurs (

Tableau 2). Trois groupes sont situés sur une ou plusieurs AAC avec un enjeu nitrate et un groupe n'est pas situé sur un territoire à enjeu eau, afin de tester la genericité de la démarche d'accompagnement. Les agriculteurs constituant les groupes et les animateurs déployant la démarche sont volontaires, motivés par le collectif et prêts à tester une nouvelle approche. Pour deux groupes, les agriculteurs ont été sollicités par un agriculteur moteur ; pour les deux autres, c'est l'animateur du collectif déjà existant qui a sollicité des agriculteurs motivés.

La démarche d'accompagnement a été pensée pour être déployée au sein d'un petit groupe d'agriculteurs pour favoriser la conception collective participative. Elle ne vise pas la représentativité statistique à l'échelle d'un territoire mais repose sur un groupe pionnier d'agriculteurs volontaires et moteurs, en faisant l'hypothèse que par la suite ils pourront être vitrine de ce qu'il est possible de réaliser pour le territoire, et ainsi motiver d'autres agriculteurs.

Tableau 2 : principales caractéristiques des quatre groupes pilotes du projet GAZELLE

Groupes pilotes	GIEE "Agr'eau-Logic" (59)	Bassin d'Alimentation de Captage (BAC) de Lesquielles (02)	Zone d'Actions Renforcées (ZAR) de Caix (80)	BAC de Sacy et de la Plaine d'Estrées (60)
Profil des animateurs	Conseiller en Agriculture de Conservation des Sols à la chambre d'agriculture du Nord-Pas de Calais, animateur de 3 GIEE	Conseiller fertilisation azotée (et suivi problématique nitrate) à la chambre d'agriculture de l'Aisne	Conseillère production végétale à la chambre d'agriculture de la Somme	Animatrice des BAC (Liancourtois Vallée dorée et Plaine d'Estrées et Sacy-le Grand); poste partagé entre deux collectivités
Nombre agriculteurs	7	7	6	10
Profil des agriculteurs	Sept polyculteurs ; agriculteurs présentant un intérêt pour l'ACS.	Deux polyculteurs et cinq polyculteurs-éleveurs ; beaucoup d'élevage sur le territoire ; dont 3 agriculteurs associés dans des unités de méthanisation	Cinq polyculteurs et un polyculteur-éleveur ; beaucoup de cultures industrielles et peu d'élevage sur le territoire	Huit polyculteurs, un polyculteur-éleveur et un producteur de légumes plein champ ; cultures assez diversifiées
Succession culturale dominante	Betterave-Blé-Pomme de terre-Blé-Pois/Haricot-Blé	Betterave -Blé-Colza-Blé (+/- pomme de terre, maïs, escourgeon)	Betterave-Blé-Pomme de Terre- Blé - Légumes industrielles-Blé	Betterave-Blé- Colza -Blé - Blé/Escourgeon/Orge de printemps (+/- maïs, pois de conserve ou d'hiver et légumes de plein champ)
Types de sol majoritaires	Limons argileux profonds	Limon argileux profonds et limons moyens profonds	Limons profonds battants	Limons profonds
Apport de produits organiques	Pas d'apport pour deux agriculteurs ; apport 1 fois tous les 3 ans en moyenne : fientes de volaille majoritairement	Apport 1 fois tous les 2-3 ans en moyenne avec doses assez importantes : fumier de bovins, lisier de porc et digestat de méthanisation majoritairement	Apport 1 fois tous les 3 ans en moyenne : fumiers de bovins, fientes de volailles, compost de déchets verts majoritairement	Apport 1 fois tous les 3-4 ans en moyenne : vinasse, compost de déchets verts, fientes de volailles ; pas d'apport pour deux agriculteurs
Enjeu eau	Peu de pression nitrate	Forte pression nitrate	Très forte pression nitrate	Forte pression nitrate
Groupe positionné sur une AAC	Non	Oui	Oui	Oui

Diagnostics initiaux

Le déploiement de la démarche d'accompagnement imaginée dans GAZELLE démarre par deux phases de diagnostic. La première consiste à réaliser une caractérisation agroenvironnementale et sociotechnique du territoire sur lequel la démarche se déploie, dans le but d'identifier les freins et leviers à l'adoption de pratiques vertueuses et d'adapter les solutions proposées aux spécificités du territoire et de ses acteurs (Casagrande et al., 2023). Elle consiste à caractériser d'une part les spécificités agronomiques (assolement, rotations types, sols majoritaires, systèmes de production, etc.), environnementales (zones naturelles, humides, tampons, captages, problématiques d'érosion, de ruissellement, etc.) en faisant un zoom sur la qualité de l'eau (état de masses d'eaux, évolution des teneurs en nitrate, etc.), et d'autre part les spécificités sociotechniques (acteurs présents sur le territoire, positionnement et attentes vis-à-vis de la démarche, les modalités d'implication de chacun dans la démarche, etc.)

Cette première phase de caractérisation conduit à la réalisation de fiches synthétiques (**Erreur ! Source du renvoi introuvable.**). Elles résument les principales informations à prendre en considération dans chaque groupe pilote (constitué d'un petit groupe d'agriculteurs volontaires) pour (1) que les animateurs et l'ensemble des parties prenantes s'approprient leur territoire, (2) interpréter les résultats à venir et (3) en faciliter la communication.

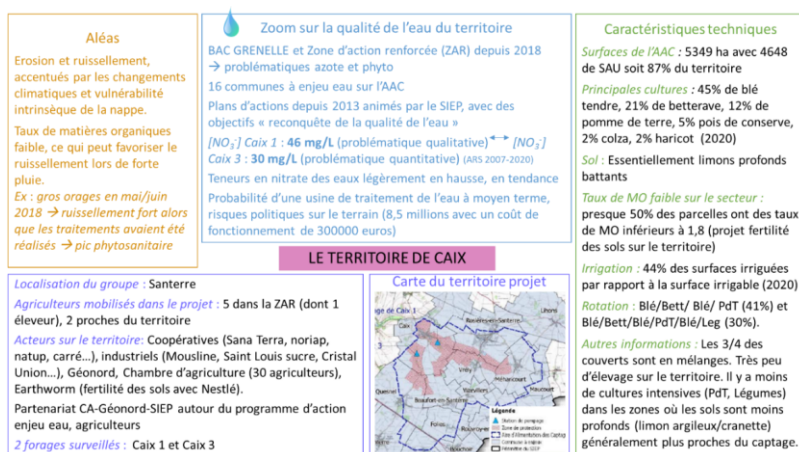


Figure 7 : exemple de fiche "set de table" synthétisant les caractéristiques agroenvironnementales d'un des groupes pilotes

La deuxième phase de diagnostic consiste à évaluer les pertes azotées et les situations à risques sur les parcelles suivies au sein des agriculteurs du groupe pilote (identifiées au préalable). Il représente un point de départ essentiel pour évaluer les évolutions de pertes et de pratiques sur les groupes. Pour cela, nous avons sélectionné, dans le cadre du projet GAZELLE, l'outil Syst'N^{®79}. C'est un outil intégrateur des connaissances scientifiques et qui mobilise différents modèles (STICS, NOE, ...). Il simule les flux d'azote à l'échelle de la parcelle, dans un sol et sur un pas de temps journalier. Celui-ci permet une évaluation 1) à l'échelle spatiale de la parcelle et temporelle de la rotation culturale (temps long), 2) des flux d'azote dans le sol, la plante, vers l'atmosphère ou encore au-delà du système racinaire et 3) avec des sorties pédagogiques qui permettent aux agriculteurs et utilisateurs de se réapproprier le cycle de l'azote et les processus à l'origine de pertes

⁷⁹ <http://www.rmt-fertilisationenvironnement.org/moodle/course/view.php?id=8>

azotées (Bedu et al.,2023 ; Delesalle et al.,2023). Ces connaissances sont essentielles pour comprendre les origines et facteurs pertes puis par la suite pour raisonner par objectifs de résultats et déterminer les solutions adaptées aux parcelles suivies.

Ce diagnostic des pertes azotées est réalisé au tout début de la démarche puis mis à jour annuellement. Pour réaliser ce diagnostic, il est nécessaire de collecter les données des années précédentes (systèmes de culture et sols) des agriculteurs du groupe et de simuler avec l'outil Syst'N® les flux d'azote correspondants. Il permet d'identifier avec les agriculteurs les situations de fortes pertes et de déterminer les facteurs à l'origine de ces pertes). Ces facteurs sont très dépendants de l'orientation technico-économique du territoire et du contexte agronomique et pédoclimatique (présence d'élevage ou non, de cultures industrielles ou non, sols superficiels ou profonds, etc.). Par ailleurs, le diagnostic permet d'identifier les situations de faibles pertes au sein du groupe, illustrant des pratiques permettant une gestion atypique et inspirante de l'azote au sein du collectif.

La précision du diagnostic et le nombre de simulations par groupe diffèrent selon la disponibilité et le profil de l'animateur. Par exemple, sur le groupe de Lesquelles, les simulations ont été réalisées à partir de données collectées précisément auprès des agriculteurs sur les 14 parcelles suivies, alors que sur le groupe de Caix, les simulations ont été réalisées sur 7 situations culturales représentatives des agriculteurs, à partir de données issues de l'expertise de l'animatrice (conseillère par ailleurs des agriculteurs suivis) en complément d'informations demandées aux agriculteurs. Ce diagnostic est ensuite mis à jour chaque année, avec les données collectées sur le terrain, pour être au plus proche de la réalité (pratiques culturales, climat, ...).

Projet de groupe

Le projet de groupe est le fil conducteur de la démarche. Il est centré sur la co-construction des objectifs de résultats, fixés collectivement par les agriculteurs et l'animateur du groupe et intègre les actions que les agriculteurs envisagent pour atteindre les résultats visés. Chaque projet de groupe est ainsi spécifique au collectif d'agriculteurs qui le porte.

Pour construire ce projet de groupe, il est essentiel de commencer par une phase d'échanges avec l'ensemble des agriculteurs du groupe pour recenser et discuter de la vision de chacun sur : le territoire, la qualité de l'eau, le rôle de l'agriculture dans le territoire et pour la qualité de l'eau, les enjeux environnementaux mais aussi agronomiques, économiques et sociaux auxquels les agriculteurs doivent faire face (Barataud et al., 2015). Cet échange permet à chacun d'exprimer librement ses craintes, ses motivations et les enjeux qui l'animent sur son exploitation comme sur le territoire.

Les enjeux ainsi définis et approfondis avec les agriculteurs du groupe constituent un socle précieux pour fixer les objectifs de résultats, socle qui motivera et guidera le groupe tout au long de la démarche. Pour formuler ces objectifs de résultats, l'animateur approfondit avec les agriculteurs (1) les services attendus par une meilleure gestion de l'azote, (2) les motivations des agriculteurs vis-à-vis des enjeux identifiés et retenus comme prioritaires, ainsi que (3) les critères de réussite *a priori* (les indicateurs leur permettant de vérifier selon eux que le service attendu serait rempli). Par exemple pour un objectif de résultat sur la qualité de l'eau concernant le volet nitrate, il conviendra d'approfondir avec les agriculteurs la concentration en nitrate sous-racinaire qu'ils choisissent de ne pas dépasser pour répondre à l'enjeu qualité de l'eau au captage du territoire, grâce aux éléments de connaissances apportés et aux discussions.

Le projet de groupe inclura aussi l'identification des leviers mobilisables à mettre en place pour répondre aux objectifs de résultats fixés, à partir notamment de l'analyse collective du diagnostic initial des pertes azotées. Dans une logique d'objectifs de résultats, l'idée n'est pas d'imposer les pratiques à mettre en œuvre mais de fournir et de discuter les pistes de solutions avec les agriculteurs, adaptées à leurs contextes, et de les laisser sélectionner, voire concevoir, celles qu'ils souhaitent tester l'année suivante (Prost et al., 2018 ; Quinio et al., 2021 ; Toffolini et al., 2016).

Objectifs de résultats sur les groupes pilotes

Différents types d'objectifs de résultats ont été fixés avec les groupes d'agriculteurs pilotes. La qualité de l'eau est un enjeu partagé par les trois groupes qui ont une pression nitrate importante sur les captages (Caix, Lesquielles et Sacy - Plaine d'Estrées). Ces trois groupes ont donc défini un objectif de résultat centré sur la concentration nitrique sous racinaire. Le groupe Agr'eau-Logic ne se situe pas sur un territoire à enjeu eau, mais les agriculteurs sont intéressés pour limiter leurs pertes azotées par lixiviation et volatilisation. Un objectif de résultat centré sur la réduction de pertes azotées a été défini et décliné en objectifs intermédiaires de pertes par lixiviation et par volatilisation à ne pas dépasser, sans que l'une ne compense l'autre.

Chaque groupe a défini et validé des objectifs de résultats chiffrés. Pour cela, différentes méthodes ont été utilisées : (1) la méthode de Burns⁸⁰ pour les groupes de Lesquielles et Sacy-Plaines d'Estrées (Burns, 1976) ; (2) pour Caix, l'objectif a été défini à partir de la concentration en nitrate que les agriculteurs ne voulaient pas dépasser sous leurs champs en vérifiant, avec les simulations Syst'N[®] que les leviers proposés par les agriculteurs permettaient bien d'atteindre cette concentration ; (3) des cas-types régionaux (définis dans le cadre du projet GAZELLE), simulés pour évaluer l'impact de leviers d'actions sur les pertes azotées, ont été utilisés sur le groupe Agr'eau-Logic pour estimer le potentiel de réduction des pertes dans les SdC et sols du groupe.

Couplé à l'objectif de résultat relatif aux pertes azotées, un autre objectif de résultat a été approfondi avec chaque groupe pour s'adapter aux motivations et enjeux du groupe, maintenir leur mobilisation et répondre à leurs attentes (**Erreur ! Source du renvoi introuvable.**).

Ces objectifs de résultats stratégiques sont déclinés en objectifs de résultats dits intermédiaires, permettant de suivre l'évolution des résultats dans le temps plus facilement et concrètement (par exemple, l'objectif de Reliquat Début Drainage (RDD) à ne pas dépasser est plus simple à mesurer et suivre que l'objectif de concentration en nitrate sous racinaire. Ils sont ensuite déclinés en objectifs dits opérationnels, associés aux pratiques permettant de répondre *a priori* à l'objectif de résultat).

Groupes pilotes	Agr'eau-Logic	Lesquielles	Caix	Sacy et Plaine d'Estrées
Objectif de résultat stratégique (qualité de l'eau)		[NO ₃] au captage < 40 mg/L		[NO ₃] au captage < 35 mg/L
	Réduire les pertes azotées de 30 % d'ici 3 ans	[NO ₃] sous racinaire < 45 mg/L	[NO ₃] sous racinaire < 50 mg/L	[NO ₃] sous racinaire < 42 mg/L
Objectif de résultat stratégique couplé	Amélioration de la dynamique de stockage C dans nos sols	Autonomie azotée	Pas d'impact sur le revenu des agriculteurs	A fixer via des ateliers de co-conception
Objectifs de résultats intermédiaires (qualité de l'eau)	Pertes par lixiviation < 16 kg N/ha et pertes par volatilisation < 4 kg N/ha	Pertes par lixiviation < 25 kg N/ha	Pertes par lixiviation < 20 kg N/ha	Pertes par lixiviation < 8 kg N/ha
	RDD < 50 kg N/ha	RDD < 50 kg N/ha	RDD < 40 kg N/ha	RDD < 50 kg N/ha
Exemples d'objectifs opérationnels	Apporter l'azote dans des conditions favorables ; Augmenter les entrées de carbone	Avoir un faible enrichissement d'azote minéral entre la récolte et le début drainage : optimiser la gestion des produits organiques & maximiser absorption des couverts avant le drainage	Piéger l'azote minéral laissé par les cultures de printemps	Piéger un maximum d'azote minéral avant le drainage : adapter sa succession de culture & maximiser absorption par les intercultures
Exemples d'actions	Implantation d'un trèfle sous couvert en avril dans le blé	Adaptation du choix des espèces dans le mélange de couverts	Mise en place d'une interculture courte après pomme de terre	Test de 4 modalités différentes de mélanges de couverts derrière pois de conserve

Tableau 3 : synthèse des projets de groupe sur les groupes pilotes

⁸⁰ Le modèle de lixiviation de Burns permet d'estimer la part de la quantité de nitrate du sol qui est lixivié. La lixiviation est alors exprimée en fraction de l'azote restant dans le sol en début de période de drainage (Burns 1976).

Tableau de bord

Le tableau de bord (TdB) est l'outil central de la démarche et est spécifique à chaque groupe (Figure 4, 5, 6). Il est construit *de novo* avec chaque nouveau collectif d'agriculteurs. Il structure, sous forme d'arborescence, les liens de cause à effet entre les résultats attendus et les actions (pratiques culturales ou animations) permettant de les atteindre, en mettant en évidence les processus intermédiaires de l'agroécosystème qui lient les résultats aux actions, et des indicateurs intermédiaires mesurables permettant de suivre l'atteinte des résultats ou états intermédiaires (par ex. le RDD pour lier les concentrations en nitrate sous-racinaires et les pratiques).

En mettant en lumière les pratiques innovantes adaptées aux spécificités agronomiques, pédologiques, environnementales ou sociotechniques du groupe, et en l'alimentant année après année par les valeurs observées des indicateurs de suivi, le TdB fournit un cadre de références personnalisé, adapté au territoire dans lequel le groupe s'insère.

Le TdB est utilisé de manière itérative sur le temps long pour pouvoir en dégager des conclusions pertinentes et indépendantes des facteurs sur lesquels les agriculteurs n'ont pas de prise (aléas climatiques, conjoncture économique, etc). L'appliquer au moins sur le temps d'une rotation culturale (environ 6 ans dans les Hauts-de-France) permet ainsi de consolider les références produites au sein du collectif. Cette capitalisation permet de faire évoluer le TdB dans le temps, en fonction des résultats obtenus par le groupe et capitalisés au fil des années (Prost et al., 2018). Par exemple, si au bout de plusieurs années, les résultats attendus ne sont toujours pas au rendez-vous malgré les actions mises en œuvre, ou *a contrario* les résultats sont atteints mais une action fléchée dans le TdB comme efficace n'est jamais réalisée et ne participe donc pas à l'atteinte du résultat, il est alors nécessaire de mettre à jour le TdB en adaptant les dites actions, car inefficaces, insuffisantes ou inutiles pour atteindre le résultat.

Exemples de tableaux de bord sur les groupes pilotes

Les TdB ont été construits progressivement par les animateurs des groupes avec les agriculteurs, en (1) reliant les éléments du projet de groupe par des liens de cause à effet pour arriver à une arborescence cohérente, (2) reformulant les objectifs et les actions, (3) allant à l'essentiel pour être lisible et compréhensible par tous les acteurs du territoire et surtout (4) associant les indicateurs de suivi et seuils correspondant à chaque étape du TdB.

Les indicateurs de suivis choisis par les animateurs en concertation avec les agriculteurs orientent les animations à mener dans le groupe et reflètent les profils des différents animateurs : indicateurs simulés et calculés sur le groupe de Lesquielles, proposés par un animateur à l'aise avec la modélisation (Figure 8) ; indicateurs avec des seuils plus ambitieux que les seuils réglementaires proposés par une animatrice qui conseille par ailleurs ces agriculteurs sur la réglementation (Figure 9), etc.

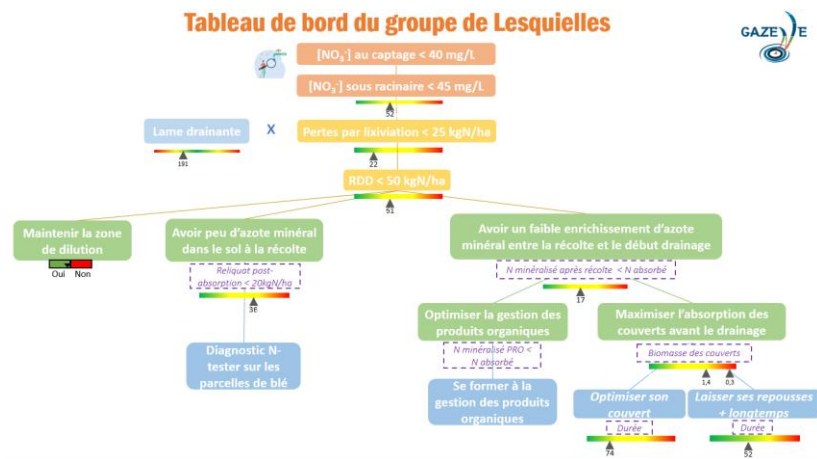


Figure 8 : TdB 2022-2023 du groupe de Lesquielles

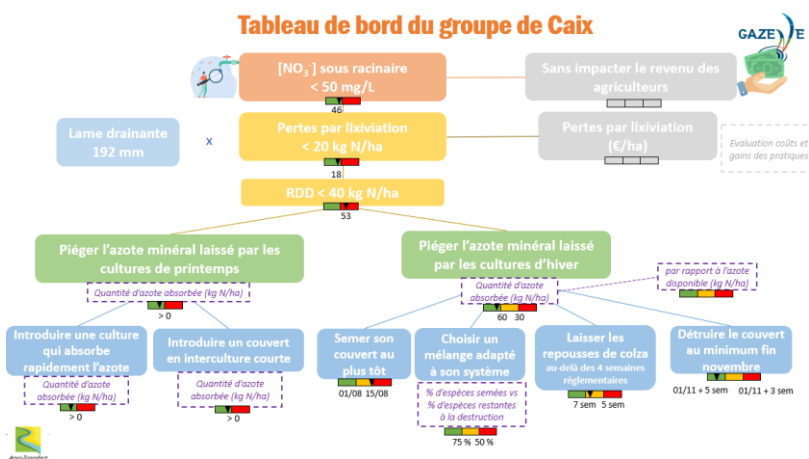
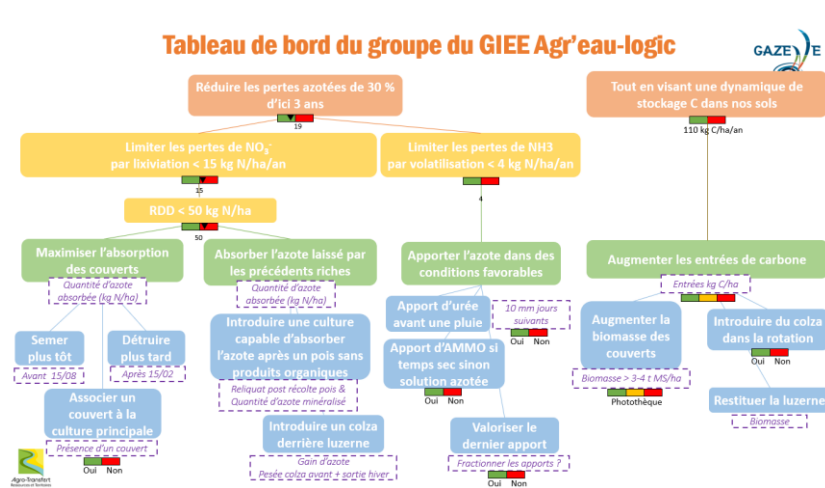


Figure 9 : TdB 2022-2023 du groupe de Caix

Les indicateurs des objectifs de résultats stratégiques (en rouge) et intermédiaires (en jaune) n'évoluent pas dans le temps. Contrairement aux objectifs opérationnels (en vert) et aux actions (en bleu) qui peuvent être modifiés ou dont les indicateurs peuvent être affinés d'une année à l'autre en fonction des apprentissages réalisés. Par exemple sur le groupe de Caix (Figure 9), les seuils de l'indicateur "quantité d'azote absorbé en kg N/ha" sont volontairement génériques pour une première année de suivi ; ils seront affinés au fil des années de simulations avec Syst'N® et des pesées de biomasse réalisées. Les indicateurs et leurs seuils associés permettent de créer un référentiel local et adapté au groupe, en intégrant le climat de l'année comme variable explicative parmi d'autres.

Les indicateurs reflètent également les motivations des agriculteurs. Par exemple, pour le groupe Agr'eau-Logic, l'intérêt collectif pour le stockage de carbone a conduit à utiliser le TdB pour fixer des objectifs combinant réduction des pertes azotées et stockage de carbone dans le sol (Figure 10).



Outre une personnalisation indispensable aux spécificités du groupe, la co-construction des tableaux de bord permet une meilleure appropriation par les agriculteurs. L'intérêt pédagogique du TdB réside dans la liberté qu'ils ont de choisir les actions qu'ils vont tester et de mettre en évidence eux-mêmes l'impact de leurs actions sur les résultats, en s'appuyant sur les connaissances du fonctionnement de l'agroécosystème.

Animations

Cette étape permet d'accompagner les agriculteurs dans la mise en œuvre des actions évoquées en ateliers et de les aider à prendre leurs décisions. Pour aider les agriculteurs à passer à l'action, l'animateur organise des tours de plaine, des ateliers d'échanges de pratiques ou d'apports de connaissances et toutes autres actions (visites de fermes, interventions d'experts, démonstrations, etc.) qui donneront l'impulsion nécessaire aux agriculteurs pour mettre en place les leviers identifiés visant à atteindre le résultat escompté. L'ensemble de ces actions d'animation sont à adapter à chaque groupe et animateur.

Cette étape s'appuie sur des mesures au champ pour alimenter les indicateurs du TdB (RDD, pesées de biomasse, etc). D'année en année, les agriculteurs acquièrent les ordres de grandeur pour leurs parcelles, leur permettant de se repérer par rapport aux années et aux agriculteurs du groupe, de mieux connaître leur agroécosystème et de les inciter à améliorer leurs pratiques.

La démarche s'appuie aussi sur l'observation des parcelles à certains moments clés de l'année pour fournir des indicateurs et référentiels visuels aux agriculteurs. Cette étape est fondamentale pour que les agriculteurs s'approprient le raisonnement par objectifs de résultats et observent l'état de leurs parcelles par le prisme de la qualité de l'eau (Ferrané et al., 2020 ; Paravano et al., 2016).

Les animations proposées au groupe devront naturellement s'adapter aux calendriers agricoles et aux spécificités du groupe. La Figure 11 ci-dessous illustre un calendrier type d'animation à organiser sur un groupe appliquant la démarche.

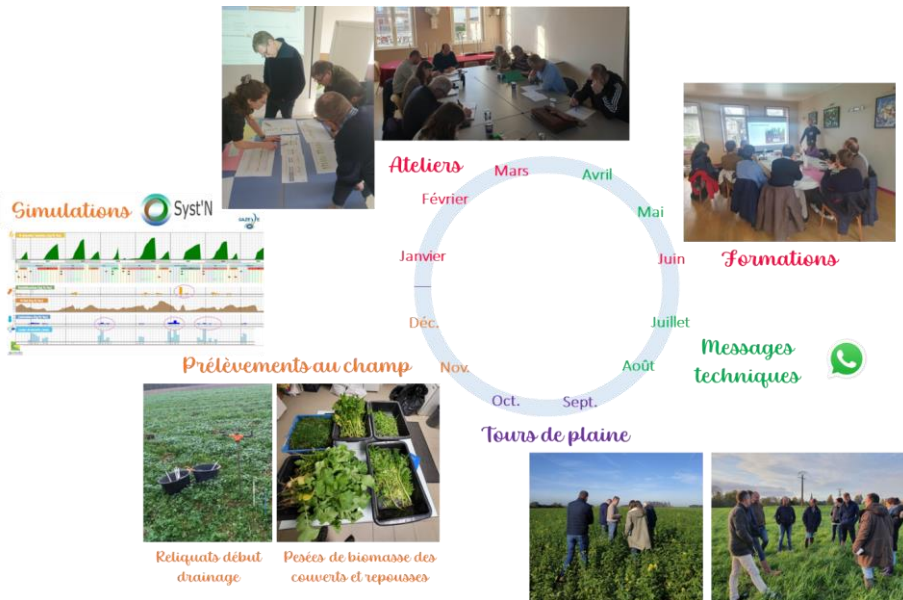


Figure 11 : Programme d'animation type de la démarche d'accompagnement

Animations sur les groupes pilotes

Une simulation Syst'N® personnalisée a été réalisée et discutée avec chaque agriculteur des groupes pilotes lors des réunions collectives ou individuelles. Ces ateliers autour des résultats de simulations se sont révélés phares pour la mobilisation des agriculteurs, leur appropriation des mécanismes à l'origine des pertes azotées sur leurs parcelles et l'émergence d'idées d'actions pour construire le projet de groupe et *in fine* le TdB.

Pour les objectifs couplés, différents ateliers ont été réalisés avec les agriculteurs. Le groupe Agr'eau-Logic souhaitait travailler sur la réduction des pertes azotées tout en visant une dynamique de stockage de carbone dans les sols. De ce fait, trois ateliers ont été organisés en hiver 2022-2023 : le premier autour des leviers pour limiter les pertes azotées, le deuxième autour des leviers pour stocker plus de carbone dans les sols, un troisième pour échanger sur les synergies et antagonismes entre ces deux familles de leviers. En plus des simulations Syst'N®, des simulations avec l'outil Simeos-AMG⁸¹, évaluant l'évolution des stocks de carbone dans les sols, ont été réalisées. Pour le groupe de Caix, en écho à leur objectif de performance économique, une évaluation économique des gains et coûts générés par les pratiques mises en place a été réalisée. Sur le groupe de Sacy - Plaine d'Estrées, les objectifs personnels des agriculteurs sont variés. Des ateliers de co-conception sont ainsi organisés sur les exploitations de chacun pour répondre à l'objectif couplé de chaque agriculteur. Pour les groupes de Lesquielles et de Caix, face aux nombreuses questions soulevées sur les cultures intermédiaires (CI), un intervenant extérieur a été convié dans ces deux groupes pour les former aux multiservices des CI.

Il est primordial d'associer à ces ateliers en salle, plutôt l'hiver, des sorties au champ (Figure 12).

⁸¹ <http://www.simeos-amg.org/>

Plusieurs tours de plaine sont ainsi organisés pendant l'interculture, période clé d'absorption de l'azote disponible dans le sol et susceptible de se lixivier au drainage. En septembre-octobre, il s'agit de visualiser l'évolution des couverts, discuter de l'implantation, des réussites et difficultés des uns et des autres. Au début du drainage, peu avant de réaliser les prélèvements de RDD et de biomasse des couverts, un nouveau tour de plaine est organisé pour « prendre les paris » sur les niveaux de RDD et biomasse produite par les couverts. Les agriculteurs sont invités à évaluer leur couvert sous le prisme de la qualité de l'eau en estimant l'azote qu'ont piégé les CI en positionnant la parcelle par rapport à l'objectif de RDD. Ce sont de précieux échanges pour s'approprier le raisonnement par objectifs de résultats, pour associer des indicateurs visuels aux indicateurs qui seront mesurés (azote absorbé par les pesées de biomasse, RDD) et ainsi, affûter les repères des agriculteurs en rendant plus concrets les référentiels de résultats capitalisés dans le TdB. Une photothèque propre à chaque groupe est en cours d'élaboration pour associer ces repères visuels aux résultats obtenus.



Figure 12 : Tour de plaine organisé sur le groupe de Lesquielles en novembre 2022

Démarche itérative

La démarche (illustrée en Figure 5) est itérative et se met en place sur le temps long pour porter ses fruits. Chaque année, le TdB est complété par les observations au champ, les mesures et les simulations, qui permettent de monitorer, voire de mettre à jour le projet de groupe. L'analyse du TdB met en évidence les actions qui ont été efficaces, non concluantes ou insuffisantes pour atteindre les objectifs de résultats. Si certains agriculteurs atteignent les résultats attendus avec des pratiques différentes de celles mentionnées dans le projet de groupe, ce n'est pas un problème, au contraire, il sera intéressant de les étudier pour inspirer les autres agriculteurs du groupe ; *a contrario*, si les objectifs de résultats ne sont pas atteints, il conviendra d'en analyser les raisons et potentiellement de tester d'autres actions. Ainsi, les dites actions composant le projet de groupe sont mises à jour, tout comme le TdB correspondant (avec de nouveaux indicateurs de suivis) et le programme d'animation qui en découle. Une nouvelle boucle d'animation visant à renseigner les indicateurs de suivi du TdB est alors enclenchée. Cette actualisation du projet de groupe, du TdB et de la boucle d'animation rejoint la notion de gestion dynamique des AAC de Ferrané et al. (2020), ainsi que la gestion adaptative développée par Plantureux et de Sainte-Marie (2010) où l'adaptation des pratiques ne repose pas sur des préconisations de sachants mais sur l'observation des parcelles au fil du temps.

Des ressources adaptables et des référentiels contextualisés pour outiller les animateurs dans la mise en œuvre de cette démarche

La boîte à outils créée donne accès à diverses ressources, destinées avant tout aux animateurs de groupes d'agriculteurs pour mettre en œuvre les étapes de la démarche (Figure 13). Ces ressources ont été pensées pour être adaptables aux spécificités de chaque groupe. Par exemple, les fiches "set de table" pour caractériser initialement le territoire (**Erreur ! Source du renvoi introuvable.**) ou la fiche d'aide à la fixation des objectifs de résultats, sont des trames guidées mais vides à renseigner *de novo* avec chaque groupe. Le guide associé à la démarche ainsi que l'application de ces ressources sur les groupes pilotes donnent des pistes et des exemples pour en faciliter le déploiement et l'adaptation au cas de chaque groupe.



Figure 13 : Schéma illustrant les ressources de la boîte à outil d'animation

En plus des guides, supports pédagogiques et aides à l'interprétation (des pertes, des reliquats, etc) et à l'émergence d'idées (arbres exploratoires, grille d'indicateurs, etc), des fiches pédagogiques représentant des cas-types régionaux⁸² ont été construits à partir de simulations avec l'outil Syst'N®.

L'identification des cas-types a été réalisée avec l'ensemble des partenaires techniques impliqués

⁸² <https://view.genial.ly/63c15a480dfc67001353fef9/presentation-cas-types-gazelle>

dans le projet et s'est construite autour d'une typologie de SdC par type de sol représentative des Hauts-de-France, en s'appuyant sur des travaux antérieurs (Projets PERSYST, OPTABIOM, CONSYST) et des expertises locales. La typologie part des types d'exploitation majoritaires (céréaliers diversifiés, patatiers spécialisés, polyculteurs-éleveurs, etc), déclinés en rotation(s) majoritaire(s), par type(s) de sol, puis par des pratiques culturales propres à chaque "type d'exploitation x rotation x type de sol" (Figure 10).



Figure 14 : Typologie des cas-types régionaux

Chaque cas-type a été simulé avec Syst’N® pour analyser les dynamiques d’azote dans le sol tout au long de la rotation et pour évaluer les pertes azotées associées. Pour chacun de ces cas-types, les leviers mobilisables pour atténuer les pertes ont été identifiés puis le potentiel de réduction des pertes de chaque levier et par cas-type a été simulé. Le tout a été formalisé sous forme de fiches pédagogiques pour permettre aux acteurs du conseil de disposer de ressources clés en main afin de sensibiliser les agriculteurs. Ces fiches constituent un nouveau référentiel de pertes azotées et de leviers mobilisables pour les réduire, adapté aux SdC et aux types de sol des Hauts-de-France. Cette boîte à outils d’animation permet de combler les manques identifiés dans les initiatives expérimentant ce raisonnement par objectif de résultats en (1) fournissant des ressources concrètes et pédagogiques pour aider les animateurs, (2) faisant gagner du temps à l’animateur à travers des ressources prêtes à l’emploi ; (3) proposant des ressources innovantes permettant au groupe de renouveler les thématiques abordées et de maintenir la mobilisation des agriculteurs dans le temps.

Enseignements et perspectives

Premiers retours des agriculteurs et animateurs sur la démarche

Les retours des animateurs des groupes pilotes vis-à-vis de la démarche sont positifs. Même si le manque de temps pour les animateurs des groupes, aux multiples casquettes, est souvent cité comme frein, ils mentionnent qu’il s’agit “de l’animation comme on devrait la faire systématiquement”. Ils apprécient notamment la boîte à outils qui alimente les apports de connaissances attendus par les agriculteurs et qui accompagne l’animateur dans la manipulation de Syst’N®, très apprécié par les agriculteurs. Ils apprécient également l’outil TdB, qui ressort chez les animateurs comme une « bonne méthode pour structurer le conseil » : « je l’ai déjà testé, ils ont mis en place des actions dès 2022 », « c’est notre outil de cheminement collectif ».

Ce TdB a également été très bien reçu par les agriculteurs. Ils apprécient le fait qu'il donne une image complète et synthétique des résultats obtenus sur la qualité de l'eau et les efforts fournis pour les atteindre, ainsi que l'illustration des pratiques adaptées au contexte de leurs systèmes et leurs sols qui ont un effet réel sur la qualité de l'eau. Aussi, ils soulignent le fait qu'il est basé sur une logique vertueuse : mise en relief de leurs initiatives et des marges de progrès accessibles. Comme l'a également souligné un agriculteur du groupe de Sacy et la Plaine d'Estrées, il met en avant le raisonnement par objectifs de résultats en n'imposant aucun moyen mais en repérant les pratiques connues pour atteindre le résultat visé « *ce qui est bien avec ce TdB, c'est qu'il n'y a pas de dates obligatoires, c'est plus souple et plus cohérent, il conseille plus globalement d'implanter un couvert le plus tôt possible après récolte* ».

Plus largement, on observe une très bonne mobilisation des agriculteurs depuis le début des déploiements-tests de la démarche (début 2022). Ils apprécient les apports techniques, les échanges entre pairs et les interventions d'experts organisés pour alimenter le TdB et passer à l'action. Les animateurs observent que les agriculteurs s'approprient peu à peu le raisonnement par objectifs de résultats : « *ce sont les agriculteurs eux-mêmes qui observent les couverts sous le prisme qualité de l'eau, je n'ai pas besoin de les recentrer* ». En déployant la démarche pas à pas, ils n'ont aucune difficulté à interpréter leurs résultats et identifier par eux-mêmes les leviers pour atteindre le résultat visé : « *on les a laissé parler et ça coulait tout seul* ».

Actuellement la démarche est déployée avec un petit nombre d'agriculteurs du territoire ; le déploiement de ce test à plus grande échelle sera une réflexion importante dans la suite de ce projet. Il est prévu que les quatre groupes pilotes communiquent sur leurs avancées auprès des autres agriculteurs du territoire. La 1^{ère} étape d'extrapolation de la démarche sera un évènement porte ouverte, organisé par chaque groupe pilote, avec la présentation de résultats concrets obtenus. Les AAC sont des cas d'étude particulièrement intéressants car elles constituent des niches où promouvoir l'innovation (Meynard, 2016).

Une démarche clinique au service de la transition agroécologique

Cette démarche correspond à une démarche clinique dans le sens où ce sont les observations au champ combinées à la mobilisation des connaissances venant des agriculteurs eux-mêmes, des intervenants extérieurs et de l'animateur, qui permettent d'identifier des solutions adaptées aux parcelles sur lesquelles la démarche s'applique (Kockmann et al., 2019 ; Prévost et al., 2017). Basée sur l'accompagnement, elle se veut souple et adaptable : les problématiques approfondies évoluent au rythme des intérêts des agriculteurs et des transitions auxquelles ils doivent faire face. Dans le cadre du projet GAZELLE, elle est éprouvée pour le volet nitrate de la qualité de l'eau (en lien avec le contexte des Hauts-de-France), souvent en couplage avec d'autres sujets (performance économique, stockage de carbone dans les sols, autonomie azotée, etc.) mais est applicable à toute thématique, permettant de la déployer plus largement dans le cadre de la transition agroécologique. La démarche d'accompagnement a été éprouvée sur le volet azote et nitrate, il est envisagé de l'adapter sur le volet phytosanitaire, sachant que les processus qui affectent le devenir des pesticides sont beaucoup plus parcellaires, et très dépendants de chaque molécule. Il n'y a pas de connaissances aussi solides sur ce volet par rapport au nitrate. Des tableaux de bord phytosanitaire sont en cours de réflexion mais plus complexes à construire (approche systémique renforcée, résultats visibles sur le long terme).

Des travaux en appui aux politiques publiques en lien avec la qualité de l'eau

Les premiers résultats sur les groupes pilotes du projet GAZELLE fournissent des enseignements inspirants pour les prochaines politiques publiques en lien avec la qualité de l'eau.

Cette expérimentation appuie l'intérêt d'une démarche guidée par des objectifs de résultats plutôt que par des obligations de moyens. Cette logique est plus motivante pour les agriculteurs et semble plus pertinente pour obtenir des résultats en matière de qualité de l'eau puisque l'itération de la démarche vise à identifier les leviers les plus efficaces pour atteindre les résultats escomptés sur

un territoire donné (Plantureux & de Sainte-Marie, 2010). Cette expérimentation appuie dans cette continuité la nécessité de créer des référentiels adaptés au territoire du groupe mobilisé, sans chercher à généraliser les objectifs ou leviers mis en place. Le raisonnement par objectifs de résultats est indissociable d'une personnalisation auprès du groupe sur lequel on la met en place. Une telle démarche centrée sur l'accompagnement des agriculteurs vers l'atteinte des résultats rejoint la notion d'innovation institutionnelle telle que la définissent De Sainte Marie et al. (2010). Ce changement de paradigme, passant d'une logique de moyen à une logique de résultat, nécessite également une mobilisation des agriculteurs ainsi que des acteurs politiques et institutionnels pour qu'une application effective soit possible. L'ensemble de ces acteurs doivent comprendre que ce type de démarche implique (1) du temps d'animation et de formation des acteurs et (2) plus de complexité : les objectifs de résultats sont plus complexes à définir, mais plus pertinents, qu'une série de mesures génériques à appliquer. Un objectif qui n'est pas co-construit avec les acteurs concernés et adaptés à l'ensemble des spécificités locales évoquées dans cet article, ne portera ses fruits.

Cela dit, la démarche telle que décrite dans cet article a été pensée pour optimiser le temps de déploiement. Il s'agit en effet d'une démarche structurée, qui permet à l'animateur de s'organiser et en se concentrant sur l'objectif visé. Par ailleurs, la boîte à outils d'animation, présentée également dans cet article, permet de gagner du temps à chaque étape. Les cas-types régionaux peuvent par exemple être utilisés auprès des agriculteurs au lieu de réaliser des simulations individuelles avec l'outil Syst'N®.

Par ailleurs, une large diffusion de l'outil permettrait un gain de temps effectif pour les animateurs. Le premier déploiement demande un temps d'appropriation des étapes de la démarche, de la boîte à outils et du raisonnement par objectif de résultats, mais une fois appropriés, les futurs déploiements par un même animateur n'en sont que plus efficaces. Aussi, plus cette démarche sera déployée, plus les retours d'expérience seront nombreux et inspirants pour les nouveaux animateurs qui pourront appliquer les méthodes et astuces des expériences passées qui leur semblent plus adaptées à leur situation. Par ailleurs, un gain de temps et de mobilisation peut être envisagé en allégeant la démarche d'accompagnement, sans impacter les résultats attendus sur le territoire. L'exemple du groupe pilote de Sacy – Plaine d'Estrées illustre qu'il est possible de mener certaines animations de la démarche avec un groupe restreint et moteur d'agriculteurs. Nous faisons l'hypothèse que ces acteurs seront les premiers acteurs de la diffusion auprès des autres agriculteurs du territoire en partageant les résultats de leurs avancées à des moments clés de la démarche. Cette démarche se veut ainsi souple et adaptable à bien des égards, garantissant la mobilisation des acteurs d'un territoire, clés de réussite pour atteindre les résultats visés.

Remerciements

Le projet GAZELLE a pu être déployé grâce au soutien financier de :

- *la Région Hauts-de-France*
- *l'Agence de l'Eau Artois-Picardie*
- *l'Agence de l'Eau Seine-Normandie*
- *la Direction Régionale de l'Environnement, de l'Aménagement et du Logement*

Nous remercions les agriculteurs et les animateurs des groupes pilotes pour leurs investissements et leur participation au déploiement de la démarche d'accompagnement.

Nous remercions nos partenaires techniques pour leurs contributions riches et constructives : les Chambres Régionales d'Agriculture (Aisne, Somme, Nord-Pas-de-Calais, Oise), le Laboratoire Départemental d'Analyses et de recherche, Junia, l'INRAE, l'Association des Producteurs d'Endives de France et ITB. Ainsi que nos partenaires associés : la Direction Régionale de l'Alimentation, de l'Agriculture et de la Forêt, la Coopération agricole Hauts-de-France et Terres Inovia.

Enfin, nous remercions le RMT Bouclage pour l'adoption du projet GAZELLE, participant au travers de son animation et ses activités au partage de nos travaux.

Bibliographie

- AESN. (2022). *Schéma Directeur d'Aménagement et des Gestion des eaux 2022-2027*. 2022–2027.
- Barataud, Benoit, M., Beguin, P., Havet, A., Le Bail, M., Martin, P., Mathieu, A., Reau, R., Remy, B., & Vial, L. (2014). *Accompagner les acteurs dans des démarches de protection de la ressource en eau Analyse d'éléments clés et moyens mis à disposition*. Office National de l'Eau et des Milieux Aquatiques. 2014,72p.
- Barataud, F., Arrighi, A., & Durpoix, A. (2015). Mettre cartes sur table et parler de son territoire de l'eau : un (en)jeu pour les acteurs ? *Vertigo*, Volume 15 Numéro 3, 1–23. <https://doi.org/10.4000/vertigo.16766>
- Bedu, M., L. Lefèvre, A. Dupont, P. Dubrulle, R. Reau, P. Debaeke, M. Guinet, et al. 2023. « Adding a diversity of legumes to a crop decision-support system: Maintaining satisfactory accuracy while keeping the model simple ». *European Journal of Agronomy* 151 (novembre): 126999. <https://doi.org/10.1016/j.eja.2023.126999>.
- Burns. (1976). Equations to predict the leaching of nitrate uniformly incorporated to a known depth or uniformly distributed throughout a soil profile. *Journal of Agricultural Science*, 86(2), 305–313.
- Casagrande, M., Belmin, R., Boulestreau, Y., Le Bail, M., Navarrete, M., & Meynard, J. M. (2023). *Guide méthodologique pour le diagnostic des freins et leviers sociotechniques aux processus d'innovation dans des systèmes agri-alimentaires*. <https://doi.org/10.17180/w78m-dn95>
- Cerf, M., Parnaudeau, V., & Reau, R. (2019). Vers un diagnostic agronomique stratégique traitant de questions agro-environnementale. *AES. Agronomie, Environnement & Sociétés* 9.2: 27-37.
- Cnudde, M. (2021). *Diagnostic des besoins en termes de compétences des agents du développement agricoles pour accompagner la transition agro-écologique à l'échelle du système sociotechnique*. Rapport de stage. ITAB.126.
- Comité de Bassin Artois Picardie. (2016). *Schéma directeur d'Aménagement et de Gestion des Eaux du Bassin Artois-Picardie 2016-2021*.
- De Sainte Marie, C., Paratte, R., & Doussan, I. (2010). Changer de dispositifs d'action publique : d'obligations de moyens à des innovations agri-environnementales ? *Innovations Agronomiques*, 135–147.
- Delesalle, M. (2021). *Synthèse des premiers résultats du diagnostic des usages en termes de gestion de l'azote en région*. Rapport interne, Agro-Transfert-RT
- Delesalle, Marion, et Justine Chauvin. 2023. « Accompagner les agriculteurs vers une meilleure gestion de l'azote : usages de Syst'N dans le projet GAZELLE ». Poster COMIFER ,Tours, novembre 21. <https://comifer.asso.fr/wp-content/uploads/2023/11/R23-POSTER-DELESALLE-CHAUVIN-SYSTN-GAZELLE-ACCOMPAGNEMENT.pdf>.
- Ferrané, C., Paravano, L., Prost, L., Reau, R., Agronomie, U. M. R., & Grignon, I. (2020). *Guide pour une gestion dynamique du projet d'une AAC à enjeu "nitrate."* 1–54.
- Gisclard, Marie, Émilie Chantre, Marianne Cerf, et Laurence Guichard. 2015. « Co-click'eau : une démarche d'intermédiation pour la construction d'une action collective locale ? » *Natures Sciences Sociétés* 23 (1): 3-13. <https://doi.org/10.1051/nss/2015003>.
- Guillier, M., C. Cros, et R. Reau. 2020. « AUTO'N - Améliorer l'autonomie azotée des systèmes de culture en Champagne crayeuse ». *Innovations Agronomiques* 79: 193-212. <https://doi.org/10.15454/6FRB-E556>.
- Kockmann, F., Pouzet, A., Omon, B., Paravano, L., & Cerf, M. (2019). La démarche clinique en agronomie : sa mise en pratique entre conseiller et agriculteur. *Agronomie, Environnement & Sociétés* 9.2
- Leclercq, Christine, Olivier Scheurer, Justine Lamerre, Elisa Marraccini, Anne Schaub, Paul Van Dijk, et Marion Delesalle. 2021. « ABC'Terre, une démarche clinique à l'échelle du territoire ». *Agronomie, environnement & sociétés* 11 (2). <https://doi.org/10.54800/cba227>.
- Luyet, Vincent, Rodolphe Schlaepfer, Marc B. Parlange, et Alexandre Buttler. 2012. « A framework to implement Stakeholder participation in environmental projects ». *Journal of Environmental Management* 111 (novembre): 213-19. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2012.06.026>.
- Meynard, Jean Marc. 2016. « Les savoirs agronomiques pour le développement : diversité et dynamiques de production ». *Agronomie, Environnement & Sociétés* 6 (2): 17-26.

Morel, A. (2020). Évaluation des démarches de protection de l'eau fondées sur des objectifs de résultats en matière de fuite d'azote. Mémoire de master l'Institut Agro Montpellier, 198p.

Paravano, L., Prost, L., & Reau, R. (2016). Briennon-sur-Armançon : pilotage dynamique des actions d'un territoire à enjeu nitrate, à l'aide d'un observatoire et d'un tableau de bord. *Agronomie, Environnement & Sociétés*, 3(1), 10–27. <https://medium.com/@arifwicaksanaa/pengertian-use-case-a7e576e1b6bf>

Plantureux, S., & de Sainte-Marie, C. (2010). *Conception et appropriation de MAE à obligation de résultat sur les surfaces herbagères : comment concilier pertinence écologique et agricole dans l'action publique en faveur de la biodiversité ? MAE résultat*. 33–41.

Prévost, P., Michel, A., Le Gal, P. Y., & Cattin, G. (2017). Texte éditorial de “Les ateliers Terrain, une démarche participative pour une agronomie clinique.” *Agronomie, Environnement & Sociétés*, 7.

Prost, L., Reau, R., Paravano, L., Cerf, M., & Jeuffroy, M. H. (2018). Designing agricultural systems from invention to implementation: the contribution of agronomy. Lessons from a case study. *Agricultural Systems*, 164(April), 122–132. <https://doi.org/10.1016/j.agsy.2018.04.009>

Quinio, M., Salazar, P., Gardarin, A., Petit, M.-S., & Jeuffroy, M.-H. (2021). Capitaliser les connaissances avec les acteurs pour concevoir des systèmes agroécologiques. *Agronomie, Environnement & Sociétés*, 11(2), 1–14. <https://doi.org/10.54800/cca118>

Reau, Raymond, Marianne Cerf, Claire Cros, Claudine Ferrané, Michael Geloën, Vincent Lefevre, Catherine Pasquier, Marie-Sophie Petit, et Anne Schaub. 2018. « Atelier de co-conception de systèmes de culture, guide pour leur réalisation avec les agriculteurs ». https://ecophytopic.fr/sites/default/files/2019-12/2018_Guide_atelier_conception_Reau%20et%20al.pdf.

Reau, Raymond, Laure-Amélie Monnot, A. Schaub, Nicolas Munier-Jolain, I. Pambou, Christian C. Bockstaller, M. Cariolle, A. Chabert, et P. Dumans. 2012. « Les ateliers de conception de systèmes de culture pour construire, évaluer et identifier des prototypes prometteurs ». *Innovations Agronomiques* 20: 5-33.

Toffolini, Q., Jeuffroy, M.-H., & Prost, L. (2016). L'activité de re-conception d'un système de culture par l'agriculteur : implications pour la production de connaissances en agronomie. *Agronomie Environnement Sociétés*, 6.2(February 2017), 193–201.



TÉMOIGNAGE

Méthodologie d'accompagnement pour l'arrêt de l'utilisation du glyphosate dans les fermes de l'enseignement agricole technique

Corentin Clément¹

Avec les contributions de Roger Brouet¹, Laurence Péméant¹, Philippe Cousinié⁵, Alain Rodriguez², Bruno Chauvel³, Maxime Moncamp⁴, Hervé Longy⁵ et Vincent Jehanno⁵.

¹ L'institut Agro Florac, 9 Rue Célestin Freinet, 48400 Florac-Trois-Rivières

² Agroécologie, INRAE, Institut Agro, Univ. Bourgogne Franche-Comté, F-21000 Dijon

³ Acta, 6 chemin de la côte vieille, 31400 Baziège

⁴ Solagro – 75 voie du Toec, 31076 Toulouse

⁵ Animateur Réso'them transition agroécologique de l'Enseignement Agricole

Email contact auteur : corclement@gmail.com

Introduction

En 2022, toutes les fermes de l'enseignement technique agricole ont reçu l'instruction de cesser l'utilisation du glyphosate (Note de service DGER 411 du 20 mai 2022). Fin 2022, 20% de ces fermes déclaraient toujours en utiliser pour des raisons techniques, humaines et/ou économiques (Cousinié, 2023). Les différences d'usage du glyphosate sont étroitement liées aux systèmes de production et aux contextes socio-économiques et environnementaux de ces fermes. Par conséquent, il n'y a pas de solution unique et une approche globale axée sur les combinaisons de leviers est à privilégier (Reboud et al., 2017 ; Carpentier et al., 2020). Dans ce contexte, le projet CASDAR Glycos'EPA (2022-2025) a émergé avec pour objectif d'interroger les systèmes de production et d'accompagner les équipes de lycées agricoles dans la mise en œuvre de scénarios d'évolution leur permettant de sortir des difficultés rencontrées. La méthodologie utilisée vise donc à répondre aux enjeux de transition agroécologique des fermes de lycées agricoles en intégrant la diversité agronomique, sociale et environnementale intrinsèque de chaque situation tout en maintenant, ou améliorant, la rentabilité économique. L'objectif de cet article est de présenter et de discuter la méthodologie d'accompagnement mise en place dans ce projet de recherche-action pour faire de ce sujet complexe et controversé un support d'action collective au service d'innovations agronomiques et pédagogiques. Cet article s'appuie sur les témoignages recueillis auprès des membres du comité technique de Glycos'EPA et des personnels de lycées agricoles impliqués dans le projet.

Les spécificités de la méthodologie et du projet

Une complémentarité d'approche au sein du comité technique

Afin d'accompagner les lycées agricoles dans ce projet, l'Institut Agro Florac (pilote du projet) a missionné Corentin Clément comme coordinateur de projet et a mobilisé un comité technique constitué de :

- Bruno Chauvel, chercheur INRAE spécialisé en malherbologie,
- Alain Rodriguez, spécialiste de la flore adventice à l'ACTA,
- Maxime Moncamp, chargé de projet agroécologie pour l'association SOLAGRO
- Philippe Cousinié, Hervé Longy et Vincent Jehanno, animateurs de réseau thématique de l'enseignement agricole.

Un accompagnement en plusieurs temps

Ce projet a débuté en janvier 2022 pour une durée de trois ans, permettant un accompagnement en plusieurs phases.

La première phase « d'état des lieux » a été réalisée au cours d'une visite composée d'un entretien semi-directif entre les membres du comité technique et les personnels de l'établissement, d'un tour de plaine centré sur la gestion de la flore adventice ainsi que d'une séquence de réflexion collective sur le système de culture. « *Les visites avaient la capacité de balayer l'historique de la ferme, d'aller directement sur le terrain et de s'interroger collectivement sur les évolutions techniques et la place de la pédagogie sur la ferme* » explique Hervé Longy. Ces visites se rapprochent, dans l'esprit, de certains types d'ateliers de co-conception dans le sens où les personnes sont centrées sur l'échange et le partage dans une approche d'évolution pas-à-pas du système de la ferme. Les Directeurs d'Exploitation Agricoles (DEA) des lycées sont unanimes, la visite par le comité technique constitue le gros temps fort du projet.

Suite à la visite, les membres du comité technique établissent un diagnostic des performances agro-économiques et environnementales de la ferme et proposent des pistes d'évolutions. Ce document récapitule toutes les composantes du système et constitue une forme de feuille de route pour le comité technique et les équipes des lycées. Pour Bruno Chauvel « *ce diagnostic implique le comité technique à travers la formulation de propositions d'évolutions vis-à-vis du système de production, des problématiques et du contexte humain du lycée* ». Julien Marti, DEA au lycée de Nérac, ajoute, « *ce diagnostic est indispensable car il permet de savoir si les problématiques et le contexte de la ferme ont bien été compris par le comité technique* ». Par la suite, ce diagnostic est présenté par l'expert référent et discuté collectivement avec les personnels du lycée ainsi que les partenaires professionnels du territoire (ex. conseiller de chambre d'agriculture, technicien de coopérative, etc.). L'objectif de ces restitutions est de favoriser le dialogue afin que le plus grand nombre d'idées possibles soient proposés et confrontés aux attentes et aux besoins de chacun, pour aboutir à une décision collective sur les actions à mener.

La deuxième phase de mise en projet commence par la mise en place d'un groupe de travail constitué de personnels intéressés et prêts à s'impliquer. S'ensuit l'élaboration d'un plan d'action. La troisième phase, plus diffuse, consiste en une évaluation en temps réel des pratiques mises en œuvre et en l'ajustement de ces pratiques en fonction des résultats obtenus. Lors de ces deux phases, le coordinateur du projet accompagne les groupes de travail en alternant temps de visite et temps à distance en fonction de leurs besoins. Les membres du comité technique sont sollicités par les groupes de travail pour des demandes spécifiques en fonction des besoins identifiés. Durant cette phase, l'expert référent assurera une seconde visite sur l'établissement permettant de réaliser un bilan intermédiaire des premiers résultats du projet et d'accompagner la suite des actions à mettre en œuvre.

La dernière phase comprendra la communication et la valorisation des résultats auprès du territoire et à l'ensemble des lycées agricoles. Un point d'étape final sera assuré lors d'une visite par le coordinateur du projet.

Une diversité de situations

Treize lycées agricoles, répartis sur le territoire français sont engagés dans le projet (figure 1). Du fait de leur répartition géographique, ces établissements présentent une diversité de systèmes de production, de contextes socio-économiques et environnementaux et, de fait, de problématiques différentes liées à l'arrêt du glyphosate.

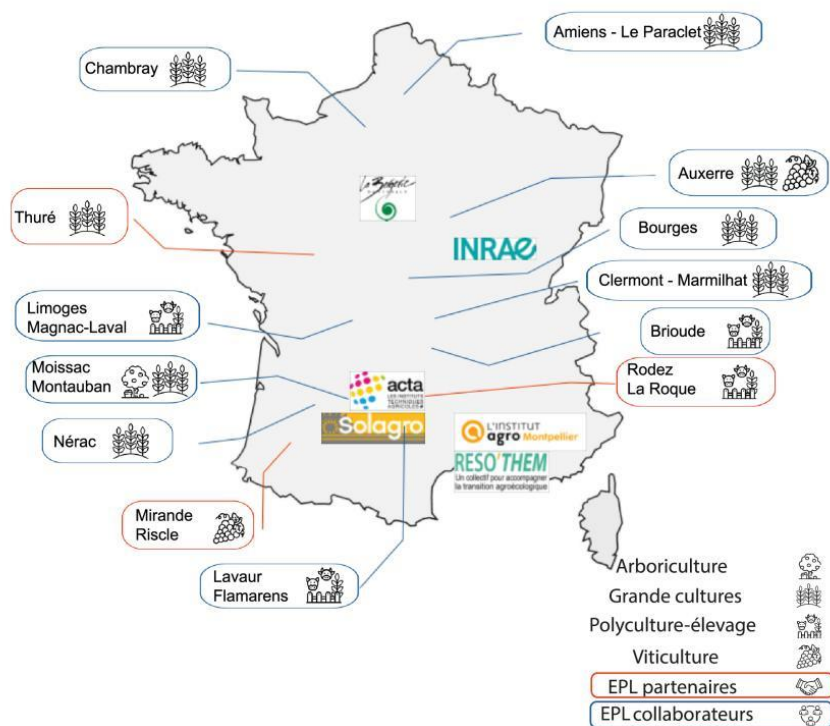


Figure 1. Lycées agricoles (EPL), partenaires et prestataires engagés dans le projet. « EPL partenaires » avec moyens financiers et obligation de résultat, « EPL collaborateurs » sans moyen financier ni obligation de résultat.

L'état des lieux de départ a permis de mettre en évidence que toutes les fermes de polyculture-élevage et de grandes cultures ont recours au glyphosate pour le désherbage des intercultures (tableau 1). Quatre fermes ont recours au glyphosate pour la destruction de couverts végétaux et seulement deux fermes de polyculture-élevage détruisent les prairies à l'aide de glyphosate. Enfin, les trois fermes viticoles et arboricoles utilisent du glyphosate pour désherber sous le rang et seulement une pour la gestion de l'inter-rang. Sur ces fermes, les usages du glyphosate sont étroitement liés aux types de sols présents et aux stratégies de réduction du travail du sol mises en place. Ainsi, sept fermes utilisent des herbicides à base de glyphosate pour cultiver des parcelles à sol superficiel ou très caillouteuses ce qui permet de minimiser le travail du sol et l'usure des outils. Quatre fermes utilisent du glyphosate pour cultiver des sols argileux et hydromorphes présentant un nombre de jours propices au travail du sol limité. Enfin, sept fermes cherchent à minimiser le travail du sol en vue d'améliorer la structure, la fertilité et la vie du sol de leurs parcelles.

La flore adventice présente sur les fermes est indicatrice des systèmes de culture en place et constitue un point de départ essentiel à la mise en place de leviers et d'alternatives adaptés à la biologie de ces plantes (rotation des cultures, désherbage mécanique). Les adventices qui posent le plus problèmes sont 1) des graminées annuelles : les ray-grass (*Lolium* sp.), les bromes (*Bromus* sp.), le vulpin des champs (*Alopecurus myosuroides*) et la folle avoine (*Avena fatua*), 2) des dicotylédones annuelles : le géranium à feuilles rondes (*Geranium rotundifolium*), le pourpier

marai cher (*Portulaca oleracea*), le datura stramoine (*Datura stramonium*), le géranium disséqué (*G. dissectum*) et la renouée liseron (*Fallopia convolvulus*), et 3) des dicotylédones vivaces : le cirse des champs (*Cirsium arvense*), le rumex cr pu (*Rumex crispus*) et le liseron des champs (*Convolvulus arvensis*).

Sur les 13 fermes du projet, l'arrêt du glyphosate pose des questions très concrètes de disponibilité en matériels et en main-d'œuvre. Parmi ces fermes, deux ne disposent pas de tracteurs adaptés (manque de puissance). Quatre fermes manquent d'outils adaptés pour le travail du sol (par ex : déchaumeur, outil intercep) et sept ne disposent pas d'outils spécifiques pour la destruction des couverts végétaux ou des prairies (par ex. : scalpeur ou rouleau hacheur). Aussi, huit de ces fermes ne disposent pas de matériel de désherbage mécanique en propre, ce qui limite leur réactivité et la capacité à intervenir au bon moment. L'augmentation du nombre de passages d'outils de travail du sol pose également la question de la disponibilité de la main-d'œuvre. Ici encore, quatre fermes manquent de personnels salariés et font face à des difficultés de recrutement. Ces difficultés de recrutement sont amplifiées sur cinq fermes par la nécessité de trouver une main-d'œuvre qualifiée pour le désherbage mécanique des cultures ou le passage d'outils intercep en arboriculture et viticulture.

Production	EPL	Système	Rotations	Problématique liée au sol	Usage du glyphosate
Grande culture	Amiens	ACS	Tournesol / Couvert / Maïs Gr. / Blé T Hiv. / Colza / Blé T Hiv. / Couvert	Superficiel	Désherbage d'interculture Destruction des couverts
	Chambray	TCS / ACS	Colza / Blé T hiv. / Couvert / Maïs Gr. / Blé T hiv. / Couvert / Tournesol / Blé T hiv. / Orge Hiv	Superficiel et caillouteux	Désherbage d'interculture
	Nérac	TCS	Colza semence / Couvert mellifère / Féverole / Tournesol semence / Blé T Hiv. / Soja / Orge Hiv.	Hydromorphes	Désherbage d'interculture Destruction des couverts
	Thuré	TCS	Luzerne (5 ans) / Maïs Gr. / Féverole / Blé T Hiv. / Tournesol		Désherbage d'interculture
Polyculture-élevage	Bourges	TCS / (ACS)	(1) Prairies temp. (>3 ans) / Blé T Hiv. / Orge Hiv. (2) Pois Hiv. / Tournesol / Blé T Hiv. / Orge Pr.	Caillouteux et hydromorphes	Désherbage d'interculture Gestion des vivaces
	Brioude	Labour / (ACS)	(1) Prairies temporaires (>2 ans) / Triticale Hiv. / Blé T Hiv. & (2) Maïs ensilage / Ray-grass + vesce		Projection en système ACS Destruction des couverts
	Limoges	ACS	(1) Prairies temp. (5 ans) / MCPI / Maïs ensilage / Blé T Hiv. (2) Luzerne / MCPI / Maïs ensilage / Blé T Hiv. / MCPI / Maïs ensilage / Blé T Hiv.		Destruction de prairies Désherbage d'interculture
	Marmilhat	Labour	Maïs ensilage ou gr. / Blé T Hiv. / Blé T Hiv.		Gestion des vivaces
	Rodez	Labour / TCS	(1) Prairies temp. (>6 ans) / Blé T Hiv. / Blé T Hiv. / Orge Hiv. (2) Prairies temp. (>6 ans) / Orge Hiv. / Orge Hiv.	Très superficiel	Destruction de prairies Désherbage d'interculture
	Lavour	TCS	Luzerne (>3 ans) / MCPI / Maïs ensilage / MCPI / Soja / Blé T Hiv.	Hydromorphe	Désherbage d'interculture (anciennement en ACS)
Viticulture / arboriculture	Auxerre	Conventionnel	NA	Superficiel et caillouteux	Désherbage du cavaillon et de l'inter-rang
	Moissac - Montauban	Conventionnel	NA		Désherbage du cavaillon
	Riscle	Conventionnel	NA		Désherbage du cavaillon et de l'inter-rang

Tableau 1 : Caractéristiques techniques des fermes impliquées dans Glycos'EPA. ACS = Agriculture de Conservation des Sols, TCS = Technique Culturelles Simplifiées, MCPI = Mélange Céréale Protéagineux Immature. () = conversion en projet.

Posture professionnelle « accompagnante » du comité technique

La complexité des situations implique une adaptation en termes de posture. L'arrivée sur une ferme commence par l'adoption d'une posture humble et respectueuse visant à ne pas porter de jugement et à se focaliser essentiellement sur la compréhension des spécificités et des capacités d'évolution de la ferme. Le comité technique a adopté une posture « d'accompagnement » qui favorise le dialogue et l'écoute de chacun, sans présupposition ni prise de position de sa part, ceci dans le but d'atteindre une mise en action collective et cohérente vis-à-vis des objectifs du projet. « On n'est pas dans un échange entre pairs mais dans le fonctionnement on s'en rapproche » explique Vincent Jehanno. La dimension d'écoute et d'échange est donc très importante car les équipes des lycées connaissent parfaitement leur ferme et les experts peuvent apporter des connaissances supplémentaires. Cette posture permet de favoriser la contextualisation, de valoriser les équipes et de s'adapter aux divergences de positionnement individuel. L'accompagnement de ces projets est donc multiforme et place les collectifs de travail au centre de leur projet. Ainsi, le comité technique joue le rôle de facilitateur avec pour objectif d'amener les membres du collectif à :

- 1) Prendre du recul collectivement sur les problématiques en question
- 2) Partager les regards et les expertises
- 3) Identifier et partager les tenants et aboutissants de chaque situation singulière
- 4) Prendre des décisions collectivement et identifier un plan d'action
- 5) Donner du sens au projet (ex : intérêt pédagogique, d'expérimentation, enjeux territoriaux, etc.)

« Accompagner ce type de projet, c'est accompagner les porteurs de projet à identifier leurs partenaires locaux, à trouver le cadre de réflexion ainsi que les moyens d'atteindre leurs objectifs. Au final, tout le monde monte en compétences, y compris les experts » résume Hervé Longy.

Intérêt pédagogique de la démarche

L'implication des équipes éducatives, de vie scolaire et de direction dans ce type de projet est essentielle pour que les évolutions techniques apportées, ou mises à l'épreuve, sur la ferme servent aussi un objectif pédagogique. Pour Hervé Longy, « l'apport de ce type de projet c'est avant tout de replacer la ferme au centre de la pédagogie. Le sujet au final a assez peu d'importance, l'important c'est qu'est-ce que les apprenants retiennent de ça ». Les objectifs pédagogiques associés au projet favorisent la mise en place d'expérimentations et de séquences pédagogiques sur la ferme. « Le fait d'avoir des moyens financiers, un accompagnement et des engagements stimule la mise en place de séquences pédagogiques et nous oblige à collecter des données et informations qui nourrissent grandement la pédagogie » expliquent Sam Sharples et Carole Bes, enseignants d'agronomie au lycée de Rodez. À travers la recherche de pratiques innovantes (partage d'expérience, intervention d'expert extérieur, revue bibliographique, expérimentations), les apprenants impliqués se retrouvent au centre de boucles d'apprentissages du type : je mets en œuvre → j'observe ce que j'ai mis en œuvre → j'analyse ce que j'ai observé → je modifie ce que j'ai mis en œuvre suite à mon analyse (Meynard et al., 2023). Ainsi, les apprenants se retrouvent acteurs des décisions prises sur la ferme et l'enseignant accompagne l'émergence et la mise en œuvre d'action, fruit de leurs idées, ce qui est source d'apprentissage et de motivation. Ces boucles modifient la posture des enseignants, des personnels de la ferme et des apprenants qui, ensemble, cherchent des solutions. Comme le résume Agathe Bures, DEA au lycée de Thuré, « ce projet permet de prendre le temps avec les élèves, de réfléchir au système de production de la ferme et de comprendre leur représentation vis-à-vis de la ferme et de l'agriculture ».

Les résultats de cette méthodologie à ce jour

Actuellement dans la deuxième année du projet, les retours d'expériences collectés permettent d'identifier les premiers résultats de cette méthodologie.

Questionner les systèmes de production et mettre en place des actions

Cette méthodologie a permis de questionner les systèmes de production et d'envisager des leviers à l'échelle de la ferme tout en intégrant les objectifs de production et les caractéristiques des systèmes agricoles pratiqués sur les territoires. Pour Nicolas Laffargue, DEA au lycée de Riscle, « on souhaite essayer d'autres manières de produire mais on ne veut pas être à contre-courant de ce qui se fait sur le territoire ». Cela se reflète dans les réflexions des équipes des lycées. Six équipes souhaitent reconcevoir leur système de production via l'utilisation d'atelier de co-conception de système de culture. Huit équipes cherchent à diversifier leurs rotations avec pour objectif de faire baisser la pression adventice ainsi que le recours aux herbicides. Perturber les cycles des adventices grâce à l'alternance de cultures d'hiver et de printemps ou intégrer des couverts végétaux ou des cultures fourragères dans la rotation sont autant d'alternatives expérimentées sur les fermes. Aussi, dix équipes repensent également leurs stratégies de travail du sol et de désherbage mécanique (figure 3) à l'échelle de la rotation, principaux leviers agronomiques pour la gestion des adventices et un arrêt de l'usage du glyphosate. Pour Agathe Bures, « ce projet sert de support aux décisions qui sont prises sur l'exploitation et il permet de justifier les changements de pratiques ». À Vincent Jehanno d'ajouter : « le fait d'aborder les systèmes de production de manière systémique permet d'intégrer plusieurs thématiques à la fois (c'est-à-dire réduction des produits phytosanitaires, changement climatique, pédagogie, etc.) ce qui renforce l'intérêt des groupes de travail pour le projet ».

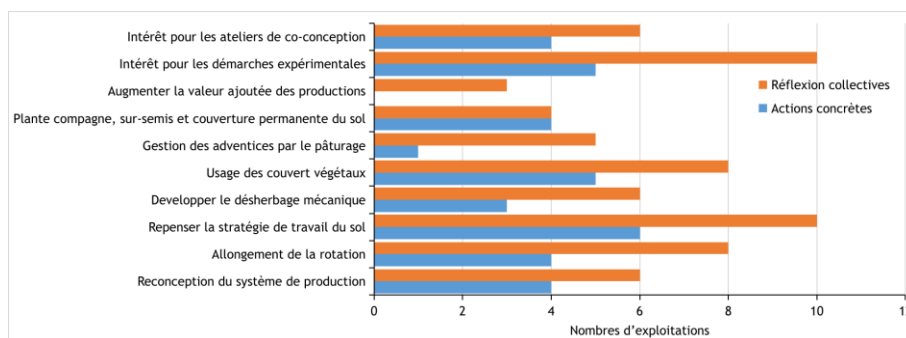


Figure 3. Réflexions et actions concrètes menées sur les lycées du projet Glycos'EPA

Ce projet permet également l'émergence de pratiques innovantes telles que la gestion des adventices par le pâturage, le semis direct sous-couvert vivant ou la mise en place de cultures compagnes. La mise en œuvre d'actions concrètes sur les lycées se fait pas-à-pas et les nouvelles pratiques sont souvent testées à titre expérimental afin de réduire la prise de risque et de favoriser les démarches innovantes. « On a émis pas mal d'hypothèses et mis en place quelques expérimentations avec des résultats assez concluants qui nous donnent des réponses à nos questions techniques donc c'est vraiment intéressant » explique Carole Bes. Naturellement, la mise en œuvre d'actions concrètes demande du temps et les chiffres à ce stade du projet sont modestes (figure 3). Cela s'explique par des réticences à agir en raison du risque associé à certaines pratiques (ex : agriculture de conservation des sols sans glyphosate) ou l'inertie nécessaire à la mise en projet. « La mise en place d'action est longue mais cela fait évoluer les mentalités et les pratiques à travers l'évolution du raisonnement du chef d'exploitation » résume Nicolas Laffargue et Agathe Bures.

Créer du lien au sein des personnels des lycées et sur les territoires

Les temps d'échanges, inhérents à la mise en place du projet et aux visites du comité technique, se sont révélés être des moments clés et privilégiés par les équipes des lycées. En banalisant des temps ou journée de travail en équipe, ces temps d'échanges permettent de prendre du recul, de réfléchir collectivement sur des problématiques concrètes et de sortir de la relative urgence des actions quotidiennes. « *C'est au cours des rencontres sur place que nous avons réellement progressé. L'engagement dans le projet pose un cadre qui oblige à prendre le temps de se poser des questions et de se fixer des objectifs* » insistent les DEA.

Cette méthodologie repose sur la création de groupes de travail au sein des lycées et sur la mobilisation de partenaires locaux. « *Le projet m'a permis de renouer avec certains partenaires et de remettre l'exploitation au centre de nos discussions* » explique Agathe Bures. Cela favorise la mise en place d'action à travers la construction de liens durables dans le temps. « *Cela a permis de faire prendre conscience à nos partenaires techniques de nos objectifs en termes de transition agroécologique. Suite à cela, ils nous ont proposé d'intégrer un projet expérimental allant dans ce sens* » explique Julien Marti.

Points fort de la méthodologie

Amener de l'expertise et favoriser les dynamiques collectives au sein des lycées

L'expertise et le regard nouveau apportés par les membres du comité technique sur les problématiques des fermes sont très appréciés des DEA et des équipes pédagogiques. « *La présence des experts constitue une réelle plus-value, cela apporte du poids au projet et motive les équipes* » explique Agathe Bures. Julien Marti ajoute : « *ils apportent une vision différente de l'exploitation sur des sujets précis comme la malherbologie, que l'on oublie un peu lorsque l'on est sur le terrain* ». Enfin, « *on se sent valorisé d'avoir des experts extérieurs au territoire qui viennent discuter sur le terrain de nos difficultés* » résume Nicolas Laffargue.

Les fermes de lycées agricoles sont aux centres d'enjeux techniques et pédagogiques où la prise de décision est collective. La composante humaine est donc très forte et l'évolution des systèmes de production repose sur la concertation et la dynamique collective entre les personnels. Pour Agathe Bures, « *ce type de projet permet de stimuler la dynamique collective au sein de l'établissement et de nourrir les réflexions au niveau du projet d'exploitation et d'établissement* ». De fait, la mise en projet repose, en grande partie, sur la capacité des porteurs de projet, en majorité des DEA, à mobiliser et à animer un collectif de travail au sein de leur établissement. Naturellement, la mise en place d'un collectif de travail est plus facile dans les établissements où le projet est explicitement partagé entre tous les acteurs et où l'intelligence collective et la recherche de consensus sont déjà au cœur du fonctionnement des équipes. Le comité technique est unanime « *si le directeur d'exploitation, les équipes éducatives et les directions arrivent à se mettre d'accord, le projet est super intéressant pour les élèves et le territoire* ».

Inclure des apprenants dans les collectifs de travail se révèle particulièrement intéressant car cela facilite la mise en action et l'émergence de pratiques innovantes car ils sont plus sensibles et/ou sensibilisés aux enjeux de transitions. « *On aurait pu plus faciliter l'implication des apprenants dès les premières visites* » insiste Bruno Chauvel.

Adaptabilité face à la diversité des situations grâce à l'intelligence collective

Cette méthodologie s'est montrée particulièrement adaptative face à chaque situation singulière en s'appuyant sur l'expertise des membres du comité technique, des personnels des lycées agricoles et du territoire. Pour Maxime Moncamp, « *la diversité des compétences techniques au sein des groupes permet de répondre précisément aux questions des équipes et d'avoir à la fois une réflexion technique à la parcelle et globale à l'échelle du système de production* ». L'adaptabilité de cette méthode se retrouve également dans l'accompagnement des équipes des lycées qui sont autonomes vis-à-vis de leurs actions et orientations. « *On se sent libre dans notre capacité d'action,*

ce qui est essentiel pour nous » explique Sam Sharples. Cette adaptabilité est nécessaire car la recherche de compromis entre les pratiques de la ferme, la pédagogie et les dynamiques du territoire est parfois complexe. Pour Agathe Bures « les systèmes d'agriculture de conservation des sols sont énormément mis en avant sur le territoire mais elles ne sont pas raccord avec les politiques publiques sur la réduction des herbicides. Cela crée des incompréhensions et suscite des questions vis-à-vis du lycée ».

Coordination et animation du projet

Le comité technique et les porteurs de projet sont unanimes il faut une personne dédiée essentiellement à la coordination et à l'animation de ce type de projet. Il faut qu'elle soit disponible, joignable et si possible ait une vision transversale (technique, pédagogique et administrative). « C'est un point essentiel de réussite » insiste Hervé Longy. À Agathe Bures d'ajouter, « en plus de l'accompagnement elle a une vision globale du projet. On peut lui poser nos questions et elle nous met en contact avec les bons interlocuteurs ».

Points de vigilance de la méthodologie

Émergence des projets au sein des lycées

Au sein des lycées, la phase d'émergence des projets doit permettre de mobiliser des personnes motivées et engagées dans l'action avec des objectifs techniques et pédagogiques clairs. Pour Carole Bes, « l'implication des équipes éducatives doit se faire dès l'amont du projet car, une fois le projet lancé, obtenir l'adhésion des collègues est difficile ». La réussite de ces projets est beaucoup liée aux personnes et à leur volonté de s'impliquer et de remplir les missions de pédagogie, de production et d'expérimentation d'une ferme de lycée agricole. L'enjeu pour les groupes de travail est de parvenir à une vision commune des objectifs du projet, de la ferme et de la pédagogie, ainsi que des moyens et du plan d'action à mettre en œuvre. Comme l'explique Sam Sharples et Carole Bes « pour impliquer les collègues il faut répondre à leurs besoins. Idéalement cela aurait dû être fait en amont du projet mais le calendrier ne le permettait pas ».

Cette phase d'émergence doit également permettre d'identifier la dynamique du lycée, les contraintes associées à chaque situation et la situation socio-économique du territoire qui influe grandement sur la dynamique de la ferme ainsi que sur les capacités d'investissement du lycée. Les besoins des équipes de lycées en termes d'accompagnement technique et pédagogique doivent également être identifiés en amont du projet afin de répondre au mieux aux attentes.

Moyens et dimensionnement des projets

Les moyens financiers mis à disposition dans les projets doivent permettre l'apport d'expertise externe, d'animation et d'appui aux fermes de lycée. Pour Hervé Longy « c'est mieux que tous les lycées bénéficient de moyens, y compris financiers. Il peut y avoir des différences de répartition mais c'est une manière de valoriser le temps et l'énergie de chacun ». Bien que l'approche en termes d'accompagnement soit similaire pour les 13 établissements, le deuxième niveau (sans financement) ne donne pas entièrement satisfaction et dans plusieurs cas on se retrouve avec des équipes peu engagées.

Les équipes des lycées sont souvent en attente d'un accompagnement technique de proximité où l'on rentre dans une analyse fine de la ferme ainsi que d'être en échanges fréquents sur plusieurs campagnes. Ainsi, le temps dont dispose chaque expert du comité technique par établissement limite les capacités d'accompagnement. Le comité technique n'a pas les moyens de réaliser un suivi de proximité et son implication se rapproche du format intervention sur une journée. « Notre rôle est plus d'amorcer des réflexions que d'accompagner les équipes au changement » résume Alain Rodriguez. Inclure des partenaires locaux au sein du comité technique du projet constitue une proposition d'évolution émise par les équipes des lycées et le comité technique qui permettrait de combiner expertise globale et locale ainsi que suivi ponctuel et de proximité. Il y a un juste équilibre

à trouver au niveau de la fréquence et de la proximité de l'accompagnement. Un minimum de deux visites par an semble pertinent. Pour Maxime Moncamp, « *tout ceci est à remettre à l'échelle du projet où le temps d'appropriation du contexte du lycée est relativement long (~1 ans). Ainsi pouvoir accompagner une démarche expérimentale sur 2 ans, demande la mise en place de projet sur un temps plus long (~5 ans)* ».

Animation des projets et dynamiques collectives au sein des lycées

Des problématiques psychosociologiques sont apparues au cours du projet et comme l'explique Maxime Moncamp, « *lorsque les problématiques sont internes au lycée, le comité technique n'a pas de légitimité à intervenir et l'évolution du projet repose beaucoup sur le coordinateur de projet* ». La mise en place de collectif de travail est forcément complexe car cela touche aux relations humaines et interpersonnelles. Ceci est d'autant plus vrai sur la question des produits phytosanitaires qui implique un positionnement de chacun sur le sujet et ainsi une diversité de positionnement individuel qui complexifie les démarches collectives. Au sein des lycées, l'animation du projet constitue donc un facteur essentiel de réussite qui nécessite de prévoir du temps et de la communication. « *Il faut le faire vivre et surtout il faut que la méthodologie d'accompagnement et les objectifs du projet soient clairement expliqués et discutés avec les équipes du lycée* » explique Agathe Bures. Pour Nicolas Laffargues, « *lancer un projet c'est relativement simple, le souci c'est de le conduire en collectif et d'avoir un groupe investi du début à la fin* ». Il y a de gros enjeux à faire émerger, penser et animer les projets en collectif au sein des lycées.

Indicateurs de réussite du projet

À l'échelle du projet, trois grands types d'indicateurs se dessinent, 1) des indicateurs de dynamique collective, 2) des indicateurs de changement de pratiques sur la ferme et 3) des indicateurs d'impact sur les enseignements et l'implication des apprenants.

Le premier type d'indicateur de dynamique collective est simple à évaluer par des indicateurs quantitatifs (ex : nombre de partenaires locaux impliqués dans le projet, nombre de réunions de projet, etc.) mais ils ne permettent pas d'illustrer le niveau d'engagement des équipes de l'établissement et la pertinence des temps collectifs. Ce qui est intéressant, c'est de suivre la trajectoire des équipes et l'évolution de leurs réflexions (par ex. modification des pratiques, suivi d'expérimentation, partenaires locaux impliqués, etc.).

Les indicateurs de changement sur la ferme reflètent des changements concrets de pratiques. Pour les DEA « *l'indicateur évident est la réduction du volume de glyphosate utilisé ou son arrêt total. En allant plus loin la diminution des herbicides et des produits phytosanitaires* ». Cela passe par un suivi des indices de fréquence des traitements, de la fréquence et intensité de travail du sol, de la consommation de gazole non-routier ou la réalisation du bilan carbone de la ferme. Des indicateurs de suivi de culture comme les rendements, la pression des adventices par mètre carré, la diversité des cultures dans la rotation ou encore la marge brute par hectare sont également suivis.

D'un point de vue pédagogique, les indicateurs peuvent être divisés en deux catégories des indicateurs de réalisation et des indicateurs de résultats (Tableau 2) :

Indicateurs de réalisation	Indicateurs de résultats
Donner à voir une diversité de pratiques culturelles	Évolution de la complexification des discours des apprenants
Favoriser l'expression des controverses au sein du groupe-classe	Augmentation des niveaux d'engagement des apprenants dans la formation (prise d'initiative, aspects qualitatif et quantitatif des questions posées, résultats académiques (notes, appréciations, etc.), manques de volontariat
Prendre appui sur les réalités des situations professionnelles	Augmentation des capacités à expliciter les activités, les stratégies, les choix, etc.
Organiser des conditions d'enseignements pluridisciplinaires	Ambiance de la classe (Nature, qualité, dynamique, etc.)
Permettre aux apprenants de rencontrer et dialoguer avec différents acteurs de leur territoire	Qualité de la relation entre les apprenants et les professionnelle / enseignants
Promouvoir dans son enseignement les échanges et analyse de pratiques	Augmentation de l'autosatisfaction, joie, épanouissement
Aménager des temps et espaces de prise de recul, réflexion pour les apprenants	

Tableau 2 : proposition d'indicateurs pédagogiques dans la participation à l'évolution d'un système de production d'une ferme de lycée

Pour Agathe Bures, « le fait que les élèves participent et continuent de participer aux décisions de l'exploitation constitue un bon indicateur de réussite ». À Sam Sharples de conclure, « on a réussi à partir du moment où un élève rentre chez lui et dit à son père : « on a vu ça au lycée, c'est intéressant », c'est comme ça que l'on arrive à faire évoluer les pratiques ».

Conclusion

La méthodologie mise en place dans ce projet apporte des enseignements relatifs à la conduite de projet d'accompagnement des transitions agroécologiques à l'échelle des lycées agricoles. Cette méthodologie vise à prendre en compte la diversité des situations face à la question de l'arrêt de l'utilisation du glyphosate de manière systémique en abordant la complexité du processus de reconception. Elle est innovante car 1) elle s'appuie sur un comité technique aux expertises variées, 2) elle recherche la mise en place d'un collectif au sein des lycées agricoles et fonde sa réussite sur l'intelligence collective qui en découle, 3) elle est testée sur 13 lycées agricoles dans le cadre du plan de sortie du glyphosate et est donc confrontée à une diversité de situations et 4) elle constitue un support de formation pour les enseignants et élèves de lycées agricoles. Cette méthode a permis de faire émerger des réflexions importantes au sein des équipes des lycées agricoles, de faciliter la constitution d'équipe projet et la mise en action. Elle présente plusieurs atouts comme le partage d'expérience et d'expertise, la création de liens entre les acteurs et la co-construction de projet innovant. Bien que cette méthode s'adapte à la diversité des situations, elle dépend des moyens mis en place pour l'accompagnement et la mise en projet ainsi que sur la capacité des équipes de lycées agricoles à former des collectifs de travail et à se mettre en action. La phase d'émergence de ce type de projet se révèle donc être un moment clé devant permettre l'élaboration d'un collectif, d'identifier les éventuels facteurs bloquants et d'adapter les moyens et besoins d'accompagnements aux attentes des équipes de lycées.

Remerciements

L'auteur de cet article tient à remercier tout particulièrement Sam Sharples, Julien Marti, Agathe Bures, Carole Bes et Nicolas Laffargues ainsi que les équipes des lycées agricoles et les membres du comité technique impliqués dans ce projet pour leurs retours sur la méthodologie. Ce travail a été réalisé avec le soutien financier du Ministère de l'Agriculture et de la Souveraineté Alimentaire avec la contribution financière du Compte d'Affectation Spéciale Développement Agricole et Rural CASDAR. La responsabilité du Ministère de l'Agriculture et de la Souveraineté Alimentaire ne saurait être engagée.

Bibliographie

Carpentier A., Fadhuile A., Roignant M., Blanck M., Reboud X., Jacquet F., Huyghe C., Alternatives au glyphosate en grandes cultures. Evaluation économique. 2020, INRAE, 159 pages.

Cousinié, P. 2023. Synthèse de l'inventaire national Ecophyto 2022 des exploitations agricoles de l'enseignement agricole technique public, 21 pages.

Meynard J-M, Cerf M, Coquil X, Durant D, Le Bail M, et al, 2023 Unravelling the step-by-step process for farming system design to support agroecological transition. *European Journal of Agronomy*, 150, 126948.

Reboud X. et al, 2017. Usages et alternatives au glyphosate dans l'agriculture française. Inra à la saisine Ref TR507024, 85 pages.



TÉMOIGNAGE

La méthode IDEA4 comme outil de réflexion pour la reconception de systèmes agricoles : exemple de deux établissements d'enseignement engagés dans le dispositif Ecophyto' TER

Fleur MEYNIER ¹, Inès RODRIGUES ¹, Christian PELTIER ^{1,2}

¹ CEZ - Bergerie nationale

² Institut Agro Dijon

Email contact auteurs : fleur.meynier@educagri.fr

Avec les contributions de Philippe Cousinié (agronome, animateur Réso'them), Hélène Billardon (enseignante d'économie-gestion, EPLEFPA de l'Eure), Patrice Duhamel (DEA⁸³, EPLEFPA⁸⁴ de l'Eure), Simon Rousseau (enseignant de viticulture-œnologie, EPLEFPA Tours-Fondettes), Anne-Alice Serru (DEA, EPLEFPA Tours-Fondettes) et Frédéric Zahm (chercheur en agroéconomie, INRAE- ETTIS, président du comité scientifique de la méthode IDEA).

Résumé

Ce témoignage se base sur l'expérience de deux établissements engagés dans le dispositif Ecophyto' TER, et leur utilisation de la méthode IDEA4 auprès de classes pour penser la reconception des parcelles et le suivi de la durabilité de l'exploitation, et ainsi démontrer comment des établissements (et des classes) peuvent s'approprier l'outil. Ce texte propose également une ouverture sur l'enseignement du concept de durabilité dans l'enseignement agricole.

Abstract

This account is based on the experience of two schools involved in the Ecophyto' TER scheme, and their use of the IDEA4 method with classes to redesign plots of land and monitor the sustainability of the farm, thus demonstrating how schools (and classes) can make the tool their own. This text also offers an insight into the teaching of the concept of sustainability in agricultural education.

Introduction

Depuis 2014 et la loi d'avenir pour l'agriculture, l'alimentation et la forêt, la transition agroécologique est un thème majeur des politiques du ministère de l'Agriculture, notamment au travers du plan Enseigner à produire autrement (EPA), renouvelé en 2020 (« Enseigner à produire autrement pour les transitions et l'agroécologie », dit plan EPA2).

S'intégrant pleinement dans les plans EPA2 et Ecophyto II+ et faisant suite aux projets Action 16 (2009-2016) et Educ'Ecophyto (2017-2020), Écophyto' TER (2020-2023) est un dispositif national dans lequel sont engagés 31 établissements de l'enseignement agricole pour la mise en œuvre d'actions, à la fois collectives et individuelles, de réduction de l'utilisation des produits phytosanitaires.

Afin d'établir un état des lieux en début de projet et de dégager des pistes d'amélioration sur la réduction des produits phytosanitaires, les établissements devaient partir d'un point de référence : chaque exploitation a donc réalisé un diagnostic IDEA4 en y intégrant une dimension pédagogique. A l'issue de la phase de tests, près de 80 établissements d'enseignement technique agricole, répartis sur tout le territoire français, ont signé les Conditions Générales d'Utilisation (CGU) pour tester et utiliser la méthode. Parmi ces établissements sont comptabilisés les 31 membres du dispositif Écophyto' TER.

⁸³ Directeur d'exploitation agricole.

⁸⁴ Établissement Public Local d'Enseignement et de Formation Professionnelle Agricoles.

L'objectif de cet article sera de comprendre comment le diagnostic IDEA4, mobilisé en phase de test et développement, a pu nourrir la réflexion pour la reconception des systèmes de culture, dans deux contextes différents (cultures annuelles/cultures pérennes), en visant une réduction de l'utilisation des produits phytopharmaceutiques. La question sera également de savoir à quelles conditions la conduite d'un tel diagnostic est apprenante.

Pour répondre à cette problématique, nous présenterons la méthode IDEA4 puis le dispositif Écophyto'TER et nous analyserons l'utilisation d'IDEA4 dans ce projet. Ensuite seront présentés deux témoignages sur l'usage d'IDEA4 dans deux lycées agricoles impliqués dans Écophyto'TER. En conclusion, une synthèse analytique de ces témoignages permettra de discuter l'utilisation de la méthode IDEA4 dans l'optique d'un enseignement permettant aux futurs professionnels d'appréhender le concept de durabilité forte.

La méthode IDEA4 et sa mobilisation dans le projet Écophyto'TER

Qu'est-ce que la méthode IDEA4 ?

La méthode [IDEA4](https://methode-idea.org/)⁸⁵ (Indicateurs de Durabilité des Exploitations Agricoles version 4 (Zahm *et al.*, 2019 et 2023)) est une méthode d'évaluation de la durabilité des exploitations agricoles. Composée de 53 indicateurs, IDEA4 permet d'évaluer à un temps T la durabilité de l'exploitation par une méthode multicritère. Se basant sur le paradigme de la durabilité forte (pas de compensation entre les trois dimensions du développement durable) (Boutaud, 2005), IDEA4 considère que la durabilité d'une exploitation agricole renvoie finalement à sa dimension limitante parmi les trois dimensions évaluées (agroécologique, socio-territoriale et économique).

IDEA4 a abouti à une révision en profondeur de la méthode, conçue initialement à la fin des années 1990 dans l'objectif de créer « un outil d'évaluation de la durabilité des systèmes d'exploitation agricole qui soit pertinent, sensible et fiable, tout en étant accessible au plus grand nombre » (CS IDEA, 2023). Le besoin de renouvellement est venu également de la prise en compte de l'évolution des cadres réglementaires (PAC2023-2027) et des préoccupations sociétales actuelles : changement climatique, alimentation, qualité de l'air, sobriété... (Zahm *et al.*, 2019). Alors que les premières versions d'IDEA étaient peu adaptées aux cultures spécialisées, IDEA4 s'applique désormais aux exploitations pratiquant les principaux systèmes de culture : grandes cultures, élevage, polyculture-élevage, viticulture, arboriculture et maraîchage.

Un diagnostic IDEA4 offre une lecture de la durabilité de l'exploitation agricole selon deux approches : par l'approche « traditionnelle » selon les trois dimensions du développement durable (Agroécologique, Socio-territoriale, Économique), ou selon les propriétés d'un système agricole durable (Autonomie, Ancrage territorial, Capacité productive et reproductive des biens et des services, Résilience, Robustesse) (Figure 1), grande nouveauté de la version 4 avec une vision systémique et holistique de la durabilité.

⁸⁵ Site de présentation de la méthode : <https://methode-idea.org/>

Ces deux approches complémentaires par les dimensions et par les propriétés utilisent les mêmes 53 indicateurs. Dans l'approche par les dimensions, l'évaluation se fait selon un système d'unités de durabilité (Zahm *et al.*, 2019), tous les indicateurs ayant des seuils différents. Chaque dimension est notée sur 100 points, avec un système de plafonnement des indicateurs permettant différents chemins pour atteindre la note maximale, soulignant ainsi qu'il existe plusieurs manières "d'être durable". Dans l'approche par les propriétés, la notation est qualitative : les indicateurs sont affectés à une classe favorable, intermédiaire ou défavorable⁸⁶, selon leur note de l'approche par dimension (voir la légende de la Figure 1). « Les propriétés permettent une lecture transversale des dimensions de la durabilité Elles permettent d'interroger les synergies et les compromis entre chacune de ces dimensions » (Zahm *et al.*, 2019).

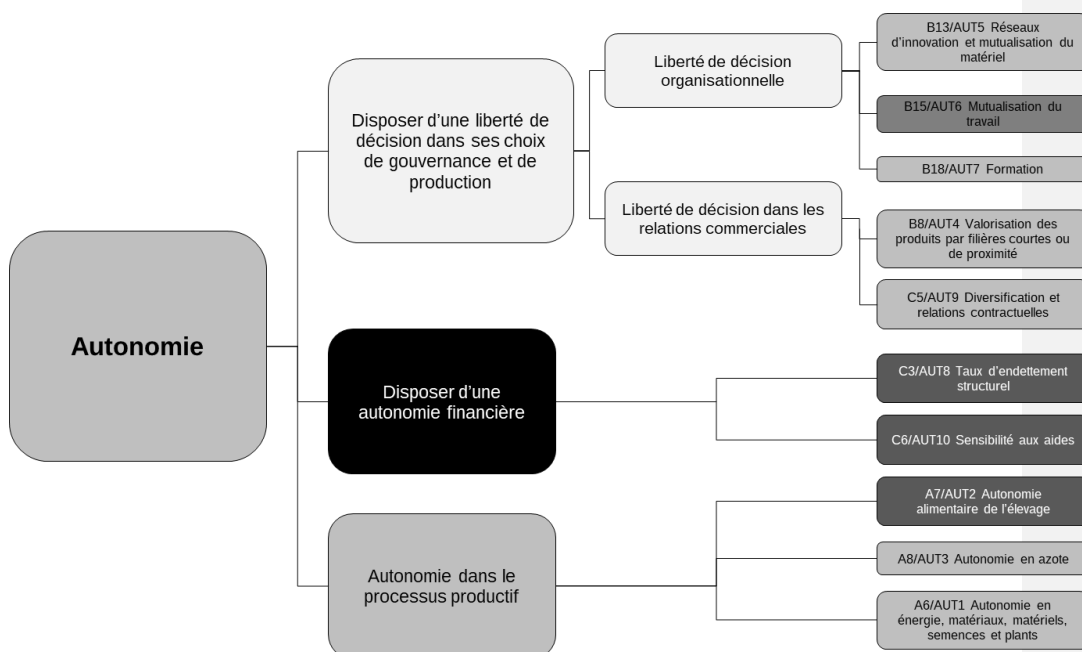


Figure 1 : Résultat graphique de l'approche par les propriétés

IDEA4 a été développée dans le cadre du projet ACTION⁸⁷, financé par un CASDAR⁸⁸ entre 2017 et 2022, qui avait parmi ses objectifs la finalisation du développement scientifique de la méthode dans ses deux approches évaluatives de la durabilité (par les trois dimensions et par les cinq propriétés) et la validation par l'usage en testant sa capacité à accompagner les changements à la transition agroécologique. La méthode a pu être testée dans différents contextes, notamment dans des démarches personnelles entamées par des exploitants agricoles, dans le conseil et l'accompagnement, dans l'action publique agro-environnementale (GIEE, MAEC, PSE, etc.) et dans l'enseignement supérieur ou technique agricoles.

⁸⁶ Les branches, agrégeant plusieurs indicateurs, peuvent être affectées à une classe « très favorable » ou « très défavorable ».

⁸⁷ Accompagnement au Changement vers la Transition agro-écologique pour une performance globale des exploitations agricoles.

⁸⁸ Compte d'Affectation Spécial « Développement Agricole et Rural ».

Écophyto'TER : un dispositif national visant la réduction du recours aux produits phytosanitaires dans 31 établissements de l'enseignement agricole

Écophyto'TER est un dispositif national d'accompagnement de 31 établissements de l'enseignement agricole à la réduction de l'usage des produits phytopharmaceutiques. Commandité par la Direction Générale de l'Enseignement et de la Recherche (DGER) du ministère de l'Agriculture et de la Souveraineté Alimentaire et financé par l'Office Français de la Biodiversité (OFB), sa mise en œuvre est assurée par le CEZ - Bergerie nationale de Rambouillet. Les objectifs de ce projet sont : de démontrer localement la faisabilité de la reconception du système de production ; de renforcer la formation ; d'affirmer le rôle de l'enseignement agricole en tant qu'acteur de la dynamique territoriale. Les établissements travaillent individuellement et en collectif (géographique ou thématique) pour favoriser les échanges de pratiques.

Dans tous les établissements du dispositif, au moins un binôme, généralement composé du DEA et d'un enseignant, a été formé à la méthode IDEA4 en 2020-2021. En effet, la réalisation d'un diagnostic et son utilisation pédagogique ont été demandés en début de projet afin de servir de base de réflexion pour la reconception cohérente des systèmes de culture des établissements, en vue de suivre la réduction de l'utilisation des produits phytopharmaceutiques. IDEA4 devait permettre d'aborder la durabilité dans une approche systémique avec les apprenants. L'analyse d'une séquence pédagogique en lien avec IDEA4 était d'ailleurs l'un des premiers livrables demandés aux établissements.

Une utilisation hétérogène d'IDEA4 dans les établissements d'Écophyto'TER

Les établissements engagés dans Écophyto'TER ont été interrogés en février 2023 sur leur utilisation d'IDEA4 via un questionnaire en ligne (tous sauf l'EPLFPA de l'Eure et l'EPLFPA de Tours Fondettes, soit 29 établissements).

28 réponses ont été reçues pour 20 établissements (certains établissements ayant fourni plusieurs réponses). Près de deux tiers des répondants avaient utilisé IDEA4 comme outil d'enseignement, principalement pour répondre à la commande d'Écophyto'TER, et, en dernier lieu, pour évaluer la durabilité de l'exploitation. Parmi eux, 4 enseignants l'ayant utilisée au cours de plusieurs années scolaires.

14 répondants avaient réalisé IDEA4 avec des apprenants, dont la moitié sous la forme d'une réponse à une commande du Directeur d'Exploitation Agricole (DEA) de l'établissement. Dans seulement 4 cas, les apprenants avaient réalisé le diagnostic complet. Dans 13 cas sur 14, les apprenants avaient formulé des propositions, et dans plus de la moitié des cas (8), les propositions des jeunes ont été prises en considération par le DEA pour la conduite et la prise de décision sur l'exploitation (davantage en tant que pistes de réflexion, en particulier sur l'autonomie fourragère, plutôt que pour la mise en pratique de propositions concrètes). 3 établissements avaient utilisé IDEA4 comme outil de pilotage stratégique pour suivre l'impact de leurs décisions sur l'évolution de la durabilité de leur exploitation (représentant 15 % des EPL ayant répondu à l'enquête). 10 répondants utilisaient d'autres outils de diagnostic et d'évaluation, parfois plus adaptés à leur contexte (horticulture) ou plus rapides et réalisables sur le terrain : [Diagagroéco](#), HVE3, RAD [CIVAM](#), IDEA3, IBEA, IFT, [Simeos](#), bilan carbone ou encore des indicateurs « maison ».

Pour certains formateurs, IDEA4 apparaît comme un outil dont le niveau d'exigence, en termes de compétences et de temps, n'est pas compatible avec une mise en application avec des apprenants. De nombreux enseignants n'avaient jamais utilisé la méthode IDEA4, alors que tous les établissements avaient été formés au lancement du dispositif Écophyto'TER. Les équipes ont eu parfois du mal à saisir l'intérêt de cet outil dans leurs pratiques pédagogiques au sein de leur établissement, à se l'approprier et le considèrent parfois comme une contrainte plutôt que comme un atout. Les contraintes les plus couramment identifiées étaient liées au temps de collecte et de traitement des données en amont des séquences avec les jeunes, et la manipulation du calculateur (alors encore en phase de développement), pas toujours évidente.

Pourtant, les témoignages développés ci-dessous sont deux exemples qui démontrent qu'IDEA4 peut être un puissant outil pour renforcer le lien entre pédagogie et exploitation d'un établissement d'enseignement agricole.

IDEA4 : des indicateurs pour réfléchir au projet d'exploitation de deux établissements d'enseignement agricole

Deux exemples ont été choisis pour illustrer la façon dont les équipes pédagogiques peuvent se saisir de l'outil IDEA4 pour aboutir, avec leurs apprenants, à la définition de leur stratégie d'exploitation.

En premier lieu, l'exemple de l'EPLFPA de l'Eure, Lycée Edouard de Chambray sera évoqué, avec son exploitation en polyculture-élevage. L'équipe pédagogique a ici fait le choix de la co-conception du plan d'actions de l'exploitation entre le DEA et les étudiants du BTS⁸⁹ ACSE⁹⁰. En second lieu, l'EPLFPA de Tours-Fondettes, pour son exploitation viticole du Domaine des Millarges, à Chinon, où l'équipe a laissé carte blanche aux BTSAs en viticulture-œnologie pour formuler des propositions de reconversion d'une parcelle, dans le cadre de la restructuration du vignoble.

IDEA4 pour concevoir un plan d'actions pluriannuel de l'exploitation de l'EPLFPA de l'Eure

Le diagnostic IDEA est utilisé depuis plusieurs années sur l'exploitation, tous les deux ans environ, afin que l'évolution des pratiques sur l'exploitation, et donc des indicateurs, soit assez significative. IDEA4 a été utilisée pour la première fois en 2020, à l'entrée de l'EPLFPA dans le dispositif Écophyto^{TER}, puis en 2022. Pour Patrice Duhamel, le DEA, et Hélène Billardon, enseignante en gestion en BTSAs ACSE, il s'agit d'un outil dont l'intérêt est double : l'objectif premier est pédagogique, il s'agit de former les apprenants au diagnostic d'une exploitation agricole et au concept de durabilité ; d'autre part, le travail des apprenants apporte une véritable plus-value pour l'exploitation dans la mesure où il permet de réaliser un suivi pluriannuel, de remettre en question les pratiques et d'établir un plan d'actions actualisé adapté à l'évolution de l'exploitation agricole. Dans le cadre de leur curriculum, les étudiants de BTSAs ACSE doivent apprendre à élaborer un diagnostic de performance globale de l'entreprise en utilisant des indicateurs d'évaluation, en interprétant les résultats et évaluant la performance au regard des stratégies déployées par l'agriculteur. IDEA4 a été réalisé avec les étudiants dans ce cadre d'apprentissage, sur l'exploitation du lycée, et a été croisé avec un autre outil, la grille de Bossel (Bossel, 1999).

Une séquence pédagogique qui profite aux étudiants et au directeur de l'exploitation

Pour la séquence réalisée en 2022, le DEA a compilé en amont les données à intégrer dans le diagnostic et a réalisé la saisie. L'enseignante de gestion a donné la consigne à ses étudiants sous la forme d'une commande passée par le DEA : « *Le chef d'exploitation a besoin de nous pour faire un diagnostic et mettre à jour le plan d'actions de l'exploitation* ». « *Et à partir de là on part dans une démarche de projet* ».

Dans un premier temps, les enseignants de gestion, d'agronomie et de zootechnie, ont présenté l'outil et les concepts qu'il développe : les 3 dimensions, les 5 propriétés et la durabilité associée. Avec le DEA, le calculateur rempli a été présenté et chaque indicateur a été décortiqué, analysé dans son mode de calcul et dans l'attribution des points. Cette étape a permis aux étudiants de pouvoir faire le lien entre les indicateurs, parfois abstraits, et les pratiques professionnelles de l'équipe de l'exploitation, bien concrètes : le DEA a alors eu l'occasion de commenter les données qui avaient été entrées dans le calculateur et a pu justifier ses choix. Les résultats des indicateurs ont été analysés collectivement. Pour le professionnel, cette séquence a permis de prendre le temps de réfléchir à ses choix, à ses pratiques, et de les passer au crible du regard des

⁸⁹ Brevet de Technicien Supérieur Agricole

⁹⁰ Analyse, Conduite et Stratégie de l'Entreprise agricole.

enseignants et des étudiants.

Le groupe d'étudiants avait pour objectif d'établir un diagnostic complet de l'exploitation, par propriétés, en réalisant une synthèse des indicateurs. L'objectif était de saisir une « photographie » de l'exploitation et d'alimenter un débat, avec le DEA, sur ses choix stratégiques et leurs résultats menant à la situation actuelle. Les étudiants ont produit un diaporama qui, après validation du DEA, a été présenté au conseil d'exploitation (pour la séquence réalisée en 2020) et à d'autres classes (pour la séquence réalisée en 2023).

L'enseignante a admis que la compréhension de l'outil et de ses concepts n'a pas été aisée pour les apprenants : certaines propriétés n'ont pas été suffisamment comprises et assimilées. Les propriétés sont une approche nouvelle d'IDEA4, et permettent de mettre en avant les interactions et les liens entre les indicateurs, mais également quel(s) aspect(s) de la durabilité ils évaluent. Il s'agit d'une approche visuelle et concrète pour comprendre le diagnostic de durabilité Il s'agissait donc pour les enseignants, tout au long de ce diagnostic, de reformuler, de synthétiser et de faire le lien entre les notions vues en cours et les indicateurs.

A la suite de ce diagnostic s'est engagée une deuxième phase de la séquence pédagogique : la conception du plan d'action de l'exploitation. Cette phase s'est déroulée sur 7 séances de 4 heures au cours desquelles les étudiants et le DEA, partant du diagnostic établi, ont travaillé à la conception du document stratégique. Le DEA a défini ses objectifs prioritaires puis le groupe « *a pris de la hauteur* ». Il revenait au DEA de bâtir la stratégie à partir de laquelle les étudiants ont rédigé le plan d'action, les jeunes intervenant ici non pas en tant qu'« experts » (ils n'ont pas amené de propositions) mais en tant qu'« accompagnateurs » de la démarche. Le plan d'action s'est présenté sous forme d'un tableau comportant les axes stratégiques (exemple : renforcer l'autonomie en consommations extérieures) ; un objectif a été défini, des leviers stratégiques identifiés, de même que les actions permettant d'y parvenir et leurs échéances. Des indicateurs stratégiques (données chiffrées simples) ont été définis pour permettre au chef d'exploitation d'évaluer très rapidement le niveau de réalisation de chaque objectif (par exemple : consommation en eau, surface de chaque culture...). Le tableau final a fait apparaître les chiffres de l'année n et les objectifs visés à n+1 ou n+2.

IDEA4... mais pas que...

Enseignante et DEA ont souligné les limites de la méthode IDEA4 : celle-ci est considérée par les apprenants comme lourde, et l'approche par les dimensions reste assez normative⁹¹, et n'a donc pas ou peu été utilisée.

C'est pourquoi l'équipe pédagogique a choisi de croiser IDEA4 avec un outil plus simple, la grille de Bossel (1999) (Figure 2). Cette grille permet une analyse du fonctionnement d'un système ou d'une exploitation dans son environnement selon les principes du développement durable (Capitaine et Jeanneaux, 2015). Dans ce cadre, le développement durable est considéré comme une propriété d'un système viable : un système, s'il est viable dans son environnement, contribue au développement durable de ce dernier. La grille de Bossel utilisée à Chambray recense six propriétés de l'environnement d'un système (la propriété « besoins psychologiques » ayant été retirée), associées à des indicateurs de viabilité du système. Dans cette séquence, cette grille prend pour point de départ les priorités définies par l'exploitant. Celles-ci sont ensuite passées au crible de la grille, ce qui conduit l'exploitant à décortiquer ses choix et à s'interroger sur ses objectifs.

⁹¹ D'après l'équipe pédagogique, certains apprenants peuvent trouver la méthode IDEA4 orientée et restrictive : certains objectifs semblent inatteignables, ce qui peut s'avérer décourageant, car même en mettant en œuvre des pratiques vertueuses, il est très difficile d'obtenir la totalité des points sans « cocher toutes les cases » (par exemple sur la consommation des intrants ou encore sur la vente directe). Cette réflexion est à relativiser compte tenu du système de compensation entre indicateurs dans chaque composante.

Propriétés de l'environnement	Principe	Comportement du système
Etat « normal » actuel	Existence	Être « compatible » avec son environnement : disposer de toutes les ressources nécessaires au fonctionnement de l'exploitation
Rareté des ressources	Efficience	Utiliser de façon efficace les ressources nécessaires au fonctionnement de l'exploitation
Variété de l'environnement	Liberté d'action	Capacité à avoir une autonomie, une liberté d'action
Variabilité de l'environnement	Sécurité et résilience	Capacité à faire face à des aléas
Changement	Adaptabilité	Capacité à faire face à des changements durables de l'environnement
Coexistence avec d'autres systèmes d'acteurs	Coexistence et responsabilité	Capacité à prendre en compte l'existence des autres acteurs de l'environnement avec lesquels l'exploitation est en interaction

Figure 2 : Extrait de la grille de Bossel utilisée à Chambray

L'équipe pédagogique a souligné l'intérêt de pouvoir comparer ces deux méthodes de diagnostic pouvant se recouper mais également parfois différer l'une de l'autre. Par exemple, la consommation en intrants et la vente directe, qui apparaissaient comme point négatif sur le diagnostic IDEA4 de l'exploitation, ne faisaient pas partie des priorités que se donnait le DEA sur la grille de Bossel. Ainsi, la complémentarité entre IDEA4 et la grille de Bossel a permis de générer un processus stimulant pour les apprenants comme pour les membres de l'équipe pédagogique et à un résultat, au travers du plan d'action, satisfaisant pour mener à bien un pilotage stratégique.

Et ça marche...

Le travail réalisé dans ce cadre a été une réussite pour l'équipe pédagogique comme pour les étudiants. « *Ça leur plait.* » En effet, les jeunes ont réalisé un travail de longue haleine (sur cinq mois) et qui avait du sens : il a fallu repartir de l'ancien plan d'action pour établir le nouveau, et les étudiants ont constaté que le plan d'action antérieur avait été suivi et de quelle façon. Ils savaient que celui qu'ils étaient en train de concevoir servirait à la stratégie de l'exploitation pour les deux prochaines années. Concernant les outils à proprement parler : les étudiants seront amenés à remobiliser la grille de Bossel à l'occasion de leur stage ; ce n'est pas le cas d'IDEA4, considéré comme trop contraignant. Pour le DEA, ce travail d'analyse a permis de prendre le temps nécessaire à la réflexion sur ses pratiques, de justifier les actions mises en œuvre. « *On repart des fondamentaux* » : les valeurs, le rôle de l'agriculteur dans la société... La démarche a été complète et a permis, aux étudiants comme à l'équipe pédagogique, de prendre le temps de la hauteur. Le plan d'action réalisé ne servira pas uniquement aux professionnels de l'exploitation, puisqu'il sera également un outil mobilisé par une classe de BTSA APV⁹² pour un travail sur la reconception de systèmes de culture.

⁹² Agronomie Production Végétale

A l'EPLEFPA de Tours-Fondettes, les étudiants contribuent à élaborer la stratégie de restructuration du vignoble

A l'EPLEFPA de Tours Fondettes, une équipe pédagogique emmenée par Simon Rousseau, enseignant en viticulture-œnologie, et Anne-Alice Serru, directrice de l'exploitation, a demandé aux étudiants en 2^{ème} année de BTSa Viticulture-Œnologie de réaliser un diagnostic IDEA4 de l'exploitation viticole du Domaine des Millarges, en vue de formuler des propositions stratégiques pour la reconversion d'une parcelle en viticulture dans le cadre de la restructuration du vignoble.

IDEA 4 avec pour toile de fond la restructuration du vignoble

Le diagnostic IDEA4 a été réalisé une première fois en 2020 par la DEA seule, pour répondre à l'engagement pris dans Écophyto^{TER}. Jugé trop complexe, il n'avait pas été repris par la nouvelle DEA (arrivée en 2021), qui n'avait pas reçu la formation à la méthode. Par ailleurs, les enseignants n'ont pu être formés qu'à l'automne 2022. Ceux-ci y ont vu une opportunité, un outil répondant aux objectifs du nouveau référentiel de formation⁹³.

Dans un contexte de restructuration du vignoble, l'équipe pédagogique est partie du postulat que des difficultés existaient sur l'exploitation. Il était intéressant de voir dans quelle mesure IDEA4 les soulignerait, et quelles perspectives pourraient en être déduites. L'objectif fixé par l'équipe ne portait pas sur la réalisation du diagnostic en tant que tel, mais bien sur l'utilisation de ce diagnostic comme outil pour réaliser des propositions.

Des étudiants acteurs de l'avenir du vignoble

Les deux enseignants formés à la méthode (viticulture-œnologie et gestion) ont fédéré une équipe pédagogique constituée de la DEA et de 3 autres enseignants (agroéquipement, biologie-écologie et agronomie). L'enseignant de viticulture-œnologie, qui avait déjà travaillé sur les versions antérieures d'IDEA, a pris le temps de former ses collègues.

En novembre 2022, Simon Rousseau a présenté aux étudiants la commande de la DEA : il s'agissait de faire un diagnostic IDEA4 de l'exploitation avec pour objectif de définir l'utilisation d'une parcelle sur laquelle la vigne avait été arrachée dans le cadre de la restructuration du vignoble (en effet, IDEA4 ne permet pas de faire une analyse à l'échelle de la parcelle agricole mais une analyse de l'exploitation dans son ensemble). Dans un premier temps, le diagnostic a été réalisé par les étudiants à partir des données collectées par la DEA, qu'ils ont par ailleurs pu interroger. Chaque groupe a saisi la totalité des données sur le calculateur afin de réaliser un diagnostic complet : « *c'est long, mais ça permet de faire des ponts* », comme l'explique Simon Rousseau. En effet, pour cet enseignant, l'enjeu était de réaliser un travail de synthèse, transversal et complet, sur l'outil de production, en faisant appel à des compétences à mobiliser dans plusieurs disciplines : viticulture, œnologie, économie...

Début janvier 2023, les étudiants ont réalisé une restitution de leur travail de diagnostic devant la classe, l'équipe pédagogique et la direction de l'EPLEFPA. A ce stade, les jeunes ont déduit du diagnostic des propositions d'orientation pour la parcelle visée, qu'ils ont présentées. Par exemple, dans la dimension « agroécologique », le diagnostic a montré une faiblesse sur la composante « diversité fonctionnelle ». Les étudiants ont alors confirmé une intuition de départ de l'équipe pédagogique, qui était la nécessité de renforcer la biodiversité dans les parcelles. Les apprenants ont donc formulé des propositions allant de l'introduction de nouvelles variétés de vignes à la production de nouveaux produits, en passant par l'introduction d'infrastructures favorables aux pollinisateurs et aux auxiliaires de culture.

Dans un second temps, la démarche s'est détachée d'IDEA4 : l'équipe pédagogique a identifié, à

⁹³ Cf. Référentiel de Diplôme Brevet de technicien supérieur agricole « Viticulture-Œnologie », Arrêté du 17 février 2021 https://chlorofil.fr/fileadmin/user_upload/02-diplomes/referentiels/secondaire/btsa/viti-2022/btsa-vo-ref-2103.pdf
Module M7 : Stratégie de production vitivinicole ; capacité 7 : Proposer une stratégie de production vitivinicole, subdivisée en deux capacités : C7.1. Evaluer une stratégie de production ; C7.2. Proposer une évolution du système de production de l'entreprise).

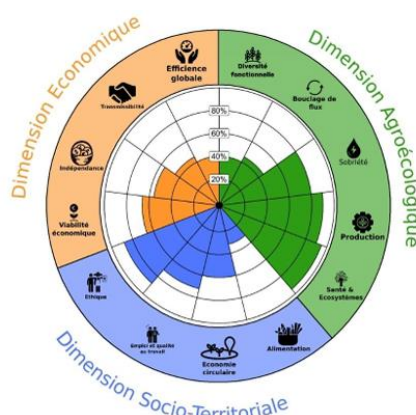
partir des propositions des étudiants, trois thèmes correspondant à des hypothèses de travail : l'agroforesterie, l'éco-pâturage, et une nouvelle plantation de vigne. Il a été demandé aux étudiants d'enquêter (au travers de recherches bibliographiques, d'études de marché...) afin de formuler des propositions plus précises et d'en estimer la faisabilité. Les étudiants avaient carte blanche afin d'éviter toute autocensure. Le livrable a pris la forme d'un poster (**Erreur ! Source du renvoi introuvable.**) et les jeunes ont été évalués à l'oral. Les étudiants ont également présenté leur travail dans le cadre de la journée de la biodiversité organisée au lycée le 22 mai 2023.

IDEA 4

Le domaine des Millarges compte 25ha de vigne dans l'AOC Chinon et regroupe 5 cépages différents. Situé sur un plateau argilo-calcaire au nord de la ville, il offre aux étudiants du Lycée Tours-Fondettes Agrocampus un cadre optimal pour leur formation.

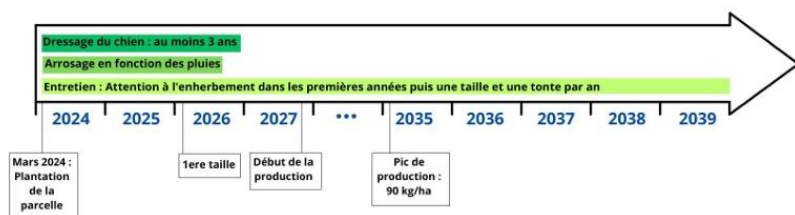
Notre étude des indicateurs de l'IDEA 4 nous a permis de dégager trois grandes dimensions: agroécologique, économique et socio-territoriale...

...Mais aussi, les points faibles de l'entreprise.



Dans l'objectif d'améliorer ces points, nous proposons un projet d'agroforesterie: **la plantation de chênes truffiers**

Echéancier



- **Durée de vie d'un chêne : 1000 à 2000 ans**
- **Récolte des truffes de décembre à mars**



Figure 3 : Extraits d'un poster élaboré par les étudiants pour la restitution du diagnostic IDEA4 – projet de plantation de chênes truffiers

Comment passe-t-on des indicateurs aux propositions ?

Chacun des groupes a réalisé la totalité de la saisie des données de l'exploitation pour remplir le calculateur IDEA4 et calculer l'ensemble des indicateurs. Cette phase a été considérée fastidieuse par tous mais correspondait à un choix pédagogique : il s'agissait de sortir du scolaire pour mettre les étudiants dans une démarche proche du monde professionnel où ils devront réaliser un diagnostic complet et formuler des propositions.

A la restitution des résultats de leur travail de diagnostic, certains groupes ont privilégié une interprétation par les dimensions, et d'autres par les propriétés. Tous ont choisi de passer en revue les indicateurs un par un. Cela reflète un certain manque de recul et de prise de hauteur pour avoir une vision d'ensemble du diagnostic. Les étudiants ont ainsi eu du mal à identifier les indicateurs clefs pour leur étude et avaient peu recontextualisé les résultats, ce que l'équipe pédagogique associe à un manque de recul par rapport à l'outil IDEA4 (complexité du diagnostic, termes parfois inconnus, trop théorique, multitude de paramètres) et à un manque de connaissance de l'exploitation.

Les enseignants quant à eux ne s'étaient pas focalisés sur les indicateurs. Leur posture, tout au long de cette démarche, était de guider les étudiants sans les influencer, afin que ceux-ci puissent porter un regard neuf sur l'exploitation et que leurs propositions ne soient pas biaisées par les projections des attentes des enseignants et de la DEA. Les résultats du diagnostic ont confirmé certains ressentis (« on sait que sur certaines choses, on est bon, et pas sur d'autres »), et parfois ont été accueillis avec surprise (« parfois on pense qu'on est bon alors qu'on est moyen »). L'équipe pédagogique a souligné néanmoins la spécificité de l'exploitation viticole, rendant certains leviers plus difficiles à mobiliser.

Les étudiants ont donc formulé une proposition pour chacun des thèmes sélectionnés : écopâturage ovins, plantation de chênes truffiers, plantation d'un cépage résistant. Celles-ci émergeaient du diagnostic et ont été développées au regard de l'expérience du territoire, au regard d'une enquête menée auprès de différents acteurs (IFV, trufficulteur, agriculteur ayant mis en place de l'écopâturage, enseignants). A défaut d'être véritablement audacieuses, elles ont été jugées cohérentes et ont conforté la DEA dans des solutions qu'elle avait déjà identifiées. Elle les mettra en place, sous réserve de financement. Les jeunes, de leur côté, ont estimé très valorisant que ce travail, mené tout au long de l'année, trouve son aboutissement dans une réalisation concrète sur la parcelle. « C'est important pour les jeunes qu'ils voient que ce n'était pas que de la théorie, qu'on a utilisé leur travail. »

La séquence ayant abouti à des projets concrets et réalisables pour l'exploitation, la démarche dans son ensemble a été considérée comme une réussite par l'équipe pédagogique comme par les jeunes. « Même quand on connaît l'exploitation depuis longtemps, on découvre encore des choses car on se pose des questions de façon différente. »

Et la suite ?

Simon Rousseau envisage de reproduire cette séquence afin, d'une part, de capitaliser sur l'expérience, en l'améliorant pour la rendre plus performante pour les jeunes (par exemple en étalant sur les deux ans du BTSA pour faciliter l'interprétation de données techniques) ; et d'autre part, de réaliser un suivi du projet d'exploitation incluant les propositions réalisées cette année et de pouvoir le cas échéant comparer avec un autre diagnostic.

Deux choix pédagogiques forts pour un bilan gagnant-gagnant

Alors que la méthode IDEA4 est parfois identifiée comme un outil contraignant par les établissements engagés dans ÉcophytoTER, qui ne parviennent pas toujours à mobiliser cette méthode dans leurs objectifs d'apprentissage, les équipes pédagogiques des EPLEFPA de l'Eure et de Tours-Fondettes ont fait le choix fort d'utiliser IDEA4 comme fil rouge pédagogique sur l'année scolaire, avec des étudiants de niveau BTSA. Cette stratégie s'est révélée « gagnant-gagnant » : pour les DEA, il s'agissait d'élaborer des outils ou propositions permettant d'améliorer la conduite

de l'exploitation à partir d'un diagnostic complet de durabilité de leur exploitation ; les étudiants quant à eux, ont acquis des connaissances prévues dans les référentiels de formation en réalisant un travail porteur de sens, valorisant, et concret. Les équipes pédagogiques comme les étudiants interrogés (pour Tours) se sont révélés complètement satisfaits de cette séquence et de ce travail réalisé en équipe dans une démarche projet.

Ce choix n'est pas forcément transposable à tous les établissements, plusieurs conditions devant être réunies : implication du DEA et éventuellement projet d'exploitation se prêtant à l'exercice, classes encadrées suffisamment outillées pour comprendre le diagnostic et son intérêt (plus facile en 2^{ème} année de BTSA, après des séances en économie/comptabilité et portant sur du vocabulaire technique), un ou plusieurs enseignants formés à la méthode pour en comprendre le fonctionnement, et l'ayant éventuellement réalisé au moins une fois... Cependant, ces deux témoignages sont des exemples de ce qu'il est possible de faire avec une classe pour travailler sur la durabilité d'un projet d'exploitation.

Des enseignements au-delà des deux situations pédagogiques proposées

Le croisement de l'enquête et des deux exemples ci-dessus avec les résultats observés plus largement auprès des 31 établissements engagés dans Écophyto⁷TER (Peltier *et al.*, à paraître) interroge sur les conditions pour que la réalisation du diagnostic IDEA4 avec des jeunes soit apprenante en termes de capacité de diagnostic et de propositions d'amélioration en termes de pratiques durables. Retenons-en les plus significatives :

- L'importance du défi à la fois intellectuel et psycho-social proposé aux apprenants. En effet, la commande d'un DEA ou d'un agriculteur motive les apprenants qui se sentent investis d'une « mission » à l'égal de « réels professionnels », comme s'ils étaient des conseillers. On leur fait confiance. On a « besoin d'eux ». Ce qu'on leur propose est en quelque sorte un « jeu authentique » (Peltier, à paraître). Ils doivent rendre des comptes « pour de vrai » et sont généralement en attente du retour du professionnel. Il est ainsi possible de constater combien la qualité de leur argumentation s'en ressent positivement : leurs analyses et propositions sont pertinentes. Et en plus ce type de mise en situation, « ça leur plaît » ... parce que ça a du sens pour eux.
- La proposition pédagogique doit se situer dans la zone proximale de développement des apprenants (Vergnaud, 1989). Si ce n'est pas le cas, les apprenants répondent aux consignes, enregistrent des données dans le calculateur, reprennent les résultats mais peinent à analyser, expliquer, interpréter ces résultats en termes de durabilité plus ou moins forte des pratiques agricoles dont ils témoignent. En revanche, si des repères sont construits avec eux (leur niveau d'étude le permet), alors ils sont en capacité de produire des raisonnements qui montrent leur bonne compréhension des résultats, base d'éventuelles propositions en termes de plan d'action.
- Le rôle de l'enseignant est clé. Il ne se situe pas dans la simple position de distributeur d'informations. Il prépare le travail en s'assurant – avec le DEA ou un agriculteur – de la bonne collecte d'informations nécessaire à la réalisation du diagnostic ; pédagogique passée par le professionnel aux apprenants ; il conçoit cette situation-problème en la négociant avec le commanditaire ; il accompagne les apprenants dans les difficultés qu'ils peuvent rencontrer ; il veille à ce qu'ils réussissent ... certes, mais par eux-mêmes. Il a un rôle de médiateur entre la situation d'apprentissage, le professionnel, les savoirs en jeu et la tâche à réaliser qui présente une valeur sociale, bien au-delà d'un simple exercice scolaire.
- Dans les deux cas, une pédagogie de la question et du problème est au cœur de l'activité d'enseignement avec IDEA4. C'est bien parce qu'il y a quelque chose qui résiste, qu'il y a un problème, qu'une enquête est nécessaire ; mais une enquête scientifiquement outillée – outil IDEA4, grille de Bossel, concept pragmatique de durabilité – afin de pouvoir identifier précisément ce qui « dysfonctionne » dans le système et proposer des solutions. Celles-ci peuvent être plus ou moins ambitieuses en termes de durabilité, ponctuelles ou systémiques.

Ce type de pédagogie dépasse la traditionnelle pédagogie de projet car elle vise à faire problématiser (Fabre, 2016) et conceptualiser (Barth, 2013) les apprenants, tout en gardant l'effet stimulant de la mise en activité pour des jeunes toujours enclins à « aller sur le terrain ».

- Le choix de la mobilisation des dimensions ou des propriétés découle en partie du point précédent. En effet, en fonction du niveau de formation et du positionnement dans la progression pédagogique (de l'enseignant, au sein du ruban pédagogique⁹⁴ d'une promotion), nous avons montré combien l'une ou l'autre pouvait être pertinente. Un travail avec les propriétés est plus qualitatif, il stimule la réflexion sur les critères et indicateurs ; un travail avec les dimensions est plus quantitatif (et normatif) et produit des résultats chiffrés à interpréter ensuite. Dans ce dernier cas, une segmentation du travail – un groupe d'apprenants ne s'occupant que d'une seule composante – est préjudiciable à une appropriation systémique de la démarche et à des raisonnements en faveur d'une durabilité forte (conformément au cadre de Bossel).
- La construction du concept pragmatique de durabilité (Peltier & Mayen, 2017) avec les apprenants constitue un passage obligé pour une bonne appropriation de la méthode IDEA4 dans l'enseignement. En effet, c'est à l'aune de cette bonne perception que ce qui distingue non-durabilité / durabilité faible / durabilité forte que les apprenants peuvent prendre du recul sur les données qu'ils collectent et manipulent, puis sur les résultats et les propositions.
- Enfin, c'est la capacité des apprenants à problématiser et conceptualiser qui paraît discriminante pour une bonne appropriation de la méthode IDEA4. En effet, sans ce travail de prise de hauteur, d'abstraction, comment les jeunes – accompagnés par leurs enseignants – peuvent-ils distinguer les indicateurs clés qui renseignent efficacement sur le fonctionnement et les performances d'un système en termes de durabilité, sur la stratégie développée par un agriculteur (son raisonnement et les impacts de ses pratiques) ? Si, au-delà de l'expérience accumulée par les enseignants sur de telles pratiques, lors de la préparation de la situation pédagogique, les enseignants ne se mettent pas eux-mêmes en enquête sur ces critères, alors ils rencontreront des difficultés à accompagner les jeunes dans cette tâche. Or, d'autres expériences d'accompagnement d'équipes (Peltier & Ringeval, 2018) montrent l'importance de cette enquête et les résultats dans la formation des apprenants à la problématisation des situations professionnelles (de travail) pour, ensuite, bien conceptualiser (*designer*) des solutions à proposer.

Conclusion

Il ressort de cette étude qu'IDEA4 peut être un outil pédagogique puissant permettant de développer le concept de durabilité appliqué à l'exploitation de l'établissement d'enseignement. Le diagnostic révèle les impacts des pratiques mises en œuvre et matérialise ce qui est souvent ressenti par les équipes. Ce diagnostic peut alors être mobilisé dans la réflexion pour concevoir des outils de pilotage, comme un plan d'action (cas de Chambray), ou pour définir une stratégie d'exploitation (cas de Tours).

Toutefois, en dépit de ces avantages, la relative complexité de mise en œuvre et le temps nécessaire pour la réalisation du diagnostic avec une classe constituent un frein à l'utilisation de la méthode pour un certain nombre d'enseignants et de DEA (ce constat serait à réviser depuis la publication officielle de la méthode en juin 2023, car ces diagnostics ont été réalisés avec une méthode en cours en développement, non finalisée). Cependant, lorsqu'une équipe enseignante s'empare de l'outil et l'intègre dans la progression pédagogique d'une classe (Peltier *et al.*, à paraître), comme dans les deux témoignages présentés précédemment, l'intérêt de la méthode, pour les apprenants et pour le DEA, est visible. L'enjeu est donc de former les équipes pédagogiques à la méthode IDEA4

⁹⁴ Par ruban pédagogique (lycée) ou tableau stratégique de formation (CFA-CFPPA), il faut entendre la progression dans les apprentissages au cours généralement des deux ans d'un diplôme professionnel agricole construite en début de formation par les enseignants et/ou formateurs.

et de valoriser les expériences positives comme celles décrites dans cet article, afin qu'ils se l'approprient et l'utilisent correctement pour enseigner au mieux l'intérêt d'un diagnostic de durabilité aux apprenants : les objectifs d'un diagnostic, les méthodes possibles pour le réaliser ; la place d'IDEA4 parmi ces méthodes ; la façon d'analyser les résultats et les limites du diagnostic. Un outil d'aide à la conception de séquences pédagogiques pour l'enseignement d'IDEA4 est en finalisation (cet outil a été testé lors de la formation de 2022 à laquelle a participé Simon Rousseau) et sera mis gratuitement à disposition⁹⁵ de l'enseignement agricole, dans la perspective de faciliter la prise en main de l'outil dans les établissements.

L'évaluation par les indicateurs de la méthode IDEA4 incite à un questionnement et à une réflexion sur le système étudié, et sur les possibilités de reconception à mettre en place pour tendre vers plus de durabilité. L'intérêt d'IDEA4 prend tout son sens dans la construction avec les jeunes du concept de durabilité (faible, forte...) et l'utilisation de ce concept pour évaluer les pratiques observées sur une exploitation à la suite de la commande d'un professionnel.

Au-delà de la pratique explorée ici dans l'enseignement agricole, les deux expériences relatées interrogent la fréquence de réalisation du diagnostic IDEA4. Le comité scientifique qui a conçu IDEA4 envisage une fréquence de 3 à 5 ans pour que le plan d'action acté après le diagnostic ait le temps de donner des résultats. Une fréquence plus réduite présente moins d'intérêt en termes de pilotage stratégique ... sans ôter celui d'un exercice scolaire.

Par ailleurs, le croisement de la méthode IDEA4 avec la grille de Bossel révèle l'intérêt majeur de la prise en compte du **conflit de valeurs** qui peut exister entre les valeurs explicites normatives (les 12 objectifs de la durabilité) de la méthode IDEA4 (conçue dans un cadre conceptuel de durabilité forte) et les valeurs portées individuellement par un agriculteur. Si ce conflit sera géré par le plan d'action (qui peut être discuté entre l'agriculteur et le conseiller), il ne s'en pose pas moins la question de la **négociation des valeurs**. Comment l'agriculteur peut-il « entendre » ce que les résultats d'IDEA4 lui disent en termes de durabilité forte, ou dit autrement de « communs » relatifs à son activité quotidienne et au jeu d'opportunités/contraintes qui règle ses décisions ? Comment un système de **réassurance** – par le biais de démarches collectives par exemple – peut-il l'inciter à prendre des décisions au-delà de sa zone de confort habituelle, de sa zone proximale de développement ? C'est-à-dire, comment peut-il prendre en compte l'écho sociétal du changement climatique, de l'effondrement de la biodiversité, comme vecteur de développement de son activité et de sa personne ? Ce qui se joue ici dépasse le cadre du diagnostic IDEA4, mais cet exercice peut être considéré comme une opportunité pour ouvrir cet espace de reconsidération du couple « intérêt individuel – intérêt collectif » pour dessiner une agriculture soutenable, désirable et faisant société (un nouveau contrat social ?) pour le XXI^e siècle.

Références

Barth, B.-M., 1987/2013. *L'apprentissage de l'abstraction*, (3^e édition), Paris, France : Chenelière éducation, Retz.

Bossel, H., 1999. *Indicators for sustainable development: theory, method, applications; a report to the Balaton group*. Winnipeg, Etats-Unis d'Amérique, IISD.

Boutaud, A., 2005. *Le développement durable : penser le changement ou changer le pansement ?* Thèse, Ecole Nationale Supérieure des Mines de Saint-Etienne, Université Jean Monnet, Saint-Etienne.

Capitaine, M., & Jeanneaux, P., 2015. De l'approche globale à l'approche systémique du changement : vers la gestion stratégique de l'exploitation agricole. *Structures d'Exploitation et Exercice de l'Activité Agricole : Continuités, changements ou ruptures ?* (p. 15). Rennes.

Fabre, M., 2016. *Le sens du problème. Problématiser à l'école ?* Louvain-La-Neuve, Belgique : De Boeck

➤ ⁹⁵ L'outil sera téléchargeable sur le site Internet de la méthode.

Education.

CS IDEA, 2023. *Historique de la méthode*. Récupéré sur IDEA Indicateur de durabilité des exploitations agricoles : <https://methode-idea.org/la-methode-et-ses-usages/historique>

Peltier, C., 2023. Enseigner (et évaluer) avec un objet pédagogique territorialisé pour apprendre les transitions et l'agroécologie. Pour une pédagogie ancrée mobilisant des « jeux authentiques », revue *Travail et apprentissages*, à paraître.

Peltier, C., à paraître. Enseigner (et évaluer) avec un objet pédagogique territorialisé pour apprendre les transitions et l'agroécologie. Pour une pédagogie ancrée mobilisant des « jeux authentiques », revue *Travail et apprentissages*.

Peltier, C., Gafsi, M., Rodrigues, I., Zahm, F., à paraître. Accompagner les enseignants pour stimuler les apprentissages autour de la transition agroécologique : mobilisation de la méthode IDEA4 dans l'enseignement agricole, revue *NOROIS*.

Peltier, C., Mayen, P., 2017. Le développement durable, une notion embarrassante pour l'enseignement – concept, schème, champ conceptuel : un cadre pour penser l'enseignement du développement durable. Actes du colloque « *Changements et transitions : enjeux pour les éducations à l'environnement et au développement durable* », p. 149-160.

Peltier, C., Ringeval, B., 2018. Enseigner avec le CASDAR Luz'Co. Quelle rupture dans la double transition engagée au lycée agricole de Cibeins ? Revue *POUR*, 234-235, p. 183-192.

Vergnaud, G., 1989. La formation des concepts scientifiques. Relire Vygotski et débattre avec lui aujourd'hui. *Enfance*, 42(1), p. 111-118.

Zahm, F., Alonso Ugaglia, A., Barbier, J.-M., Boureau, H., Del'homme, B., Gafsi, M., 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 d'Agricultures*, 28, 5.

Zahm, F., Girard, S., Alonso Ugaglia, A., Barbier, J.-M., Boureau, H., Carayon, D., Cohen, S., Del'homme, B., Gafsi, M., Gasselin, P., Gestin, C., Guichard, L., Loyce, C., Manneville, V., Redlingshöfer, B. et Rodrigues, I., 2023. *La Méthode IDEA4 - Indicateurs de Durabilité des Exploitations Agricoles. Principes et guide d'utilisation - Évaluer la durabilité de l'exploitation agricole*, Dijon, Éducagri éditions. <https://www.edued.fr/LS/IDEAV4>



ARTICLE

Enquêter les évolutions du travail en agronomie système : essais méthodologiques de trajectoires en Colombie et au Bénin

Teatske BAKKER*, Andrés VEGA-MARTINEZ**

*CIRAD, UMR INNOVATION, Parakou, Bénin.

INNOVATION, Univ Montpellier, CIRAD, INRAE, Institut Agro, Montpellier, France.
teatske.bakker@cirad.fr

** CIRAD, UMR INNOVATION, F-34398 Montpellier, France.

INNOVATION, Univ Montpellier, CIRAD, INRAE, Institut Agro, Montpellier, France.

Résumé

Le travail est au cœur de nombreux enjeux, mais peu d'approches existent pour l'étudier en agronomie système. Nous documentons la mise au point de deux approches méthodologiques intégrant l'analyse des évolutions du travail dans les exploitations familiales dans des contextes contrastés. Au Guaviare en Colombie, des trajectoires intégrant l'organisation du travail servent à étudier les facteurs d'évolution d'un territoire de front pionnier. Au Borgou au Bénin, les trajectoires d'exploitation visent à identifier les indicateurs pour caractériser l'accès à la motorisation et l'organisation du travail. Dans ces deux cas, les trajectoires intégrant des indicateurs de travail sont mobilisées pour acquérir une compréhension globale des exploitations dans des systèmes agraires en transition. Cependant, dans ces approches, l'articulation entre le travail et les choix techniques des systèmes de culture reste faible. Ce constat montre le besoin de créer ou d'adapter des approches pour l'étude du travail par les agronomes, notamment à partir des approches par l'organisation du travail développées en zootechnie système.

Mots-clés : organisation du travail, mécanisation, trajectoires, Afrique de l'Ouest, Amérique latine

Abstract

Work in agriculture is at the heart of many issues, but few approaches exist to study it in systemic agronomy. We document the development of two methodological approaches integrating an analysis of work in family farms in contrasting contexts. In Guaviare, Colombia, trajectories integrating the work organization are used to study the factors driving the evolution of a forest frontier territory. In Borgou, Benin, farm trajectories are used to identify indicators of access to motorization and work organization. In both cases, the analysis of work in agriculture is used to gain an overall understanding of farms in agrarian systems in transition. However, in both approaches the link between work and technical choices in cropping systems remains less studied. This observation points to the need to create or adapt approaches for the study of work by agronomists, based in particular on work organization approaches developed in systems zootechnics.

Keywords : work organization, mechanization, trajectories, West Africa, Latin America

Introduction

Le travail est au cœur de nombreux enjeux, notamment en relation avec la transition agroécologique des exploitations agricoles (Dumont and Baret 2017). Pour les agronomes, il se révèle nécessaire de comprendre les choix de pratiques des agriculteurs en fonction des différentes dimensions du travail, dans une diversité des situations (Coquil et al. 2018).

Cependant, peu de référentiels existent en agronomie système pour étudier le travail, et les agronomes sont absents des communautés scientifiques du travail en agriculture (Malanski et al. 2019). Les quelques approches qui existent en agronomie permettent d'analyser la gestion des calendriers de travail et d'organisation des « chantiers » (notamment en période de pointe). Ainsi, le concept des jours disponibles correspond à l'estimation du nombre de jours regroupant « les bonnes conditions » pour la réalisation d'une opération culturale, selon le climat et l'état du sol (Reboul et Maamon, 1983 cités par Delecourt (2018)). D'autre part, le modèle d'action (Sebillotte et Soler 1988) postule que l'organisation du travail résulte du processus de décision de l'agriculteur et cherche à définir les objectifs, le programme prévisionnel et les règles de décision qui caractérise le comportement de l'agriculteur (Attonaty et al. 1987 ; Delecourt 2018). La combinaison de ces deux concepts a donné naissance aux approches OTELO de modélisation de l'organisation du travail en tenant compte des contraintes climatiques, notamment en vue d'optimiser l'utilisation des équipements agricoles. Cependant il existe aussi des limites à ces outils, finalement peu utilisés par les agriculteurs sur le terrain (Delecourt 2018).

Pour proposer des référentiels (cadres théoriques et méthodologiques) en agronomie sur les différentes dimensions du travail en agriculture, les travaux en zootechnie système sur l'organisation du travail (Madelrieux and Dedieu 2008 ; Hostiou and Dedieu 2012) sont pertinents car ils s'intéressent aux pratiques, et articulent l'étude d'un système technique (le système d'élevage) avec des informations quantitatives et qualitatives sur le travail, et les grandes catégories de travailleurs. D'autres approches comme les trajectoires d'exploitations (Moulin et al. 2008 ; Terrier et al. 2012) peuvent enrichir cette analyse dans des contextes en transition.

Au-delà des apports de sciences techniques comme l'agronomie, des concepts de géographie, d'économie et de sociologie peuvent également être mobilisés par des agronomes étudiant le travail en agriculture. Ainsi, le concept de système d'activité, défini comme « *domaine de cohérence de la rationalité de l'agriculteur* » (Paul 1994, cité par Gasselin et al. (2014)), est une échelle pertinente pour comprendre des enjeux et décisions relatifs au travail, par exemple dans des situations de pluriactivité.

Dans cet article, l'objectif est de **documenter la mise au point de nouvelles méthodologies d'enquêtes diachroniques en agronomie sur l'organisation ou la réorganisation du travail dans les exploitations familiales**. Pour ce faire, nous proposons une analyse de deux approches méthodologiques dans des territoires contrastés et en transition, les départements du Guaviare en Colombie et du Borgou au Bénin. Après avoir présenté ces territoires, nous présentons les méthodologies d'enquête pour reconstituer des trajectoires d'exploitations intégrant l'analyse du travail agricole. Nous comparons ces deux approches et les indicateurs mobilisés, avant de discuter des perspectives de recherches sur la question du travail en agronomie.

Deux territoires contrastés et en transition

Site de Guaviare en Colombie

Le département du Guaviare (fig. 1) est situé dans le sud-est de la Colombie, s'étend sur 53 460 km² et compte une population d'environ 110 000 personnes (DANE 2005). Le Guaviare est un front

pionnier, ce qui signifie qu'il s'agit d'une région à fort potentiel de développement agricole en raison de sa grande superficie et de ses conditions climatiques favorables. Toutefois, ce potentiel de développement s'accompagne également d'un certain nombre de défis liés à l'utilisation des terres, à la déforestation et à la durabilité des pratiques agricoles. Il y a donc un enjeu à identifier les déterminants des trajectoires vers des territoires durables en Amazonie. Par territoire durable, on entend des fronts pionniers consolidés où il n'y a ni déforestation ni dégradation.

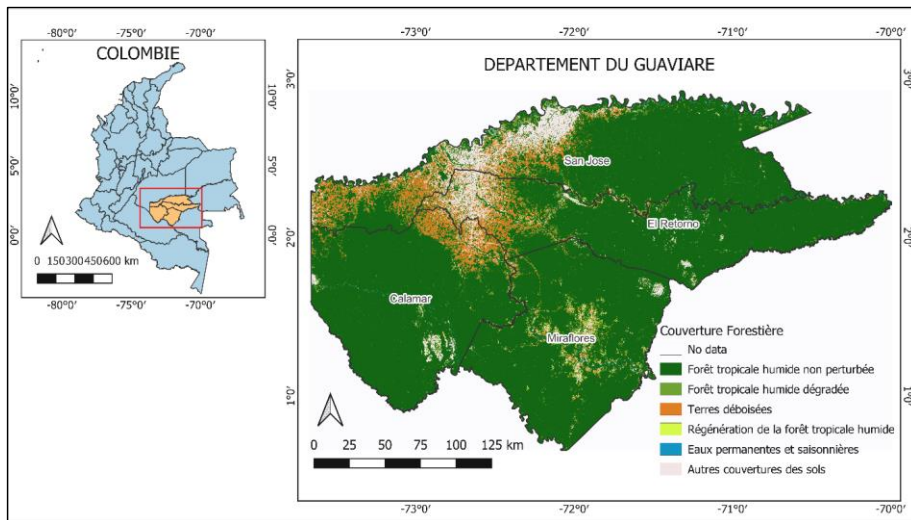


Figure 1 : Carte de la couverture forestière du département de Guaviare en Colombie (élaboration des auteurs, à partir de données du EC JRC)

L'agriculture et l'élevage occupent la majeure partie des terres. La région bénéficie d'un environnement tropical avec des précipitations annuelles moyennes de 2600mm. En juin, l'intensité des précipitations est la plus forte, avec une moyenne de 300 à 350mm, tandis qu'en janvier les précipitations sont les plus faibles, avec une moyenne de moins de 50mm. (IDEAM 2023), ce qui favorise la culture d'une variété de produits tels que le manioc, le cacao, les bananes plantain (fig. 2a), le maïs. L'élevage est un élément important de l'économie locale et comprend la production de bovins (fig. 2b), de porcs, de poulets.



Figure 2 a. Banane plantain b. bovins

Plusieurs évolutions concernent l'activité agricole dans le Borgou, et sont en interaction. Si des augmentations de la production de coton ou de céréales ont pu être atteintes, c'est essentiellement dû à une augmentation des superficies emblavées et non à un gain de productivité, en raison de la baisse de la fertilité des sols (Hounkpatin et al. 2022 ; Lihoussou and Limbourg 2022). Pour contrer cet effet, les producteurs ont recours à l'utilisation d'engrais de synthèse, accessibles principalement via la société cotonnière. Cette augmentation des surfaces cultivées est notamment permise par la motorisation du travail du sol à l'aide de tracteurs (fig. 4) ou de motoculteurs, et le recours aux herbicides pour que la gestion de l'enherbement de ces superficies agrandies ne soit pas contrainte par la disponibilité de la main d'œuvre familiale. Cette augmentation des surfaces cultivées accélère la disparition des jachères, entraîne la mise en culture de terres dégradées, mais remet également en question la place de l'élevage dans ces territoires, visible par une augmentation des conflits entre agriculteurs et éleveurs (agro-éleveurs ou éleveurs Peuls).



Figure 4 Utilisation de tracteurs Massey Ferguson au Bénin (source Balse et al 2015)

Le développement de la motorisation dans le Borgou et ses impacts sur les exploitations agricoles et les systèmes agraires sont peu documentés dans la littérature scientifique ou grise. En effet, ses effets sur les itinéraires techniques, la place de l'arbre dans les parcelles, les rotations, sur les sols et l'agroécosystème (la majorité des labours étant faits avec une charrue à disques) sont peu étudiés. Cela questionne aussi l'organisation du travail et l'emploi agricole. En raison de la proximité du Nigéria, des tracteurs et conducteurs passent la frontière pour faire des prestations à la demande. On constate également de nouveaux flux de travailleurs saisonniers et le recours à des salariés permanents, dont l'ampleur est peu connue mais mentionnée par les acteurs de terrain. De plus, la motorisation des opérations culturales amène généralement des évolutions du parcellaire et de la taille des exploitations agricoles, avec le risque de disparition des plus petites exploitations agricoles (Mazoyer et Roudart 2002 ; Baudron et al. 2019).

Présentation des méthodologies d'enquête des trajectoires d'exploitation intégrant l'analyse du travail

Cas de Guaviare en Colombie : une méthodologie pour analyser les trajectoires des exploitations agricoles en front pionnier

L'objectif de l'étude des trajectoires des exploitations agricoles dans le front pionnier du Guaviare est d'analyser la diversité des trajectoires et d'identifier celles qui mènent vers des territoires durables, c'est-à-dire des fronts pionniers consolidés (sans déforestation ni dégradation). Nous nous concentrons sur les exploitations familiales (la force du travail repose principalement sur la famille) car ce sont elles qui font face aux plus grands défis de la déforestation et de la dégradation en raison de situations socio-économiques plus tendues. Notre méthodologie (fig. 5) effectue une **analyse rétrospective basée sur l'organisation du travail** (à l'échelle de l'exploitation).

L'organisation du travail nous permet d'obtenir des informations essentielles sur la manière dont les familles gèrent la complexité des exploitations agricoles et la marge de manœuvre pour le changement. Sans analyser la trajectoire du territoire, nous analysons les facteurs territoriaux qui influencent la trajectoire des exploitations agricoles (stade du front pionnier, installation paysanne, politiques publiques, bassins de production).

Un échantillonnage est réalisé afin d'identifier les exploitations qui sont confrontées aux plus grands défis en matière de construction de territoires durables. L'échantillonnage se compose de deux étapes.

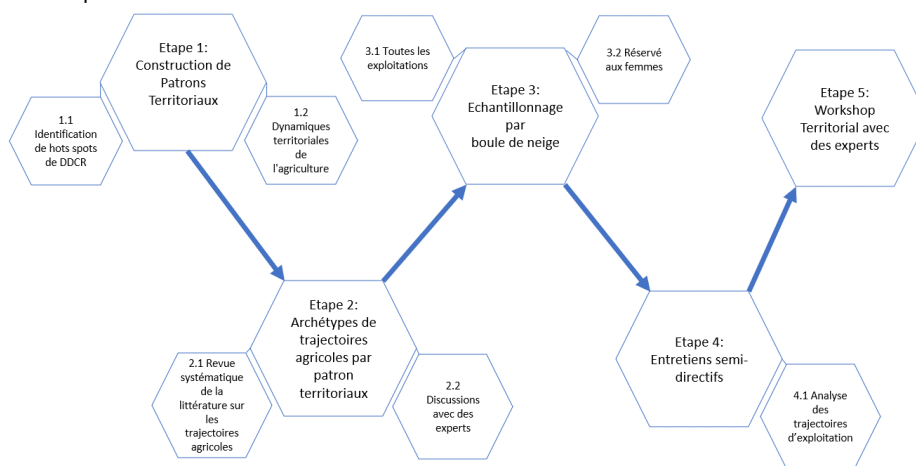


Figure 5 : Méthodologie de l'étude au Guaviare en Colombie (élaboration propre)

Étape 1 : construction de patrons territoriaux

Le choix de zones à étudier s'est fait à partir d'une reconstitution des principaux patrons territoriaux concernant l'agriculture du département du Guaviare, sur la base 1.1) d'une analyse de la transition du couvert forestier (déforestation, dégradation, régénération, conservation) jusqu'à l'année 2022 et 1.2) d'une analyse des facteurs territoriaux de l'agriculture (établissements paysans dans le département, les bassins de production, routes pavées). Les politiques publiques de colonisation et d'incitation dans le Guaviare ont également été analysées.

Étape 2 : archétypes de trajectoires des exploitations agricoles

Pour chaque patron territorial, des archétypes de trajectoires des exploitations agricoles sont élaborés à partir :

2.1) de la littérature sur les trajectoires des exploitations agricoles en front pionniers (Navegantes-Alves et al. 2012 ; Cialdella et Navegantes Alves 2014 ; Carvalho et al. 2015 ; Plassin 2018). Cette littérature nous permet de faire des archétypes basés sur les systèmes de production (données générales : taille de l'exploitation, forêt primaire et secondaire, statut foncier, systèmes d'élevage : nombre de têtes, nombre et taille des prairies, système de culture : cultures annuelles en ha, cultures pérennes en ha), et l'organisation du travail sur 4 facteurs décrits dans l'étape 4. Ces archétypes sont analysés sur une échelle temporelle des 30 dernières années, car c'est la période où la forêt se régénère et où les familles connaissent des transitions entre les générations.

2.2) de discussions avec des experts (techniciens des ONG, secrétaire à l'agriculture du gouvernement du Guaviare, associations de producteurs). Le soutien d'experts locaux est essentiel en raison des problèmes sociaux et de sécurité qui entravent l'accès au territoire.

Étape 3 : échantillonnage

Après avoir précisé ces archétypes de trajectoires agricoles, 3.1) un échantillonnage en boule de neige a été réalisé pour chaque patron territorial, avec le support des experts. 3.2) Un échantillonnage simultané est également réalisé, dans lequel seules les agricultrices sont interrogées, qu'elles soient ou non à la tête de l'exploitation.

Étape 4 : entretiens semi-directifs

Des entretiens semi-directifs sont réalisés pour corroborer ou non ces archétypes de trajectoires avec les agriculteurs, et analyser la distance qui les sépare ou non de l'archétype. L'analyse des trajectoires d'exploitation basée sur des indicateurs de l'organisation du travail cherche à analyser les changements dans le temps entre la famille et l'exploitation à travers 4 facteurs. Ces facteurs ont été choisis en raison de leur capacité à saisir les dimensions déterminantes des phases de la trajectoire sans s'engager dans des études approfondies, compte tenu du manque de données et de la difficulté d'accéder à la collecte de données dans les contextes pionniers.

- **Pluriactivité du ménage** (pas de travail à l'extérieur de l'exploitation ; un ou plusieurs membres de la famille travaillant à l'extérieur de l'exploitation ; chef d'exploitation travaillant à l'extérieur de l'exploitation ; travail permanent à l'extérieur de l'exploitation ; journaliers aux voisins ; chef ayant une meilleure activité à l'extérieur de l'exploitation (Ballon et al. 2016). La pluriactivité est essentielle pour comprendre comment les familles diversifient leurs sources de revenus (hors de la ferme), qu'elles soient dans une phase instable où elles vendent leur travail ou dans une phase stable où elles embauchent des journaliers.
- **Configuration du groupe de travail** : âge, expérience, groupe de travail et son stade par rapport à la famille, désir de transmettre à la génération suivante, participation de la génération suivante au travail (Terrier et al. 2012), pics de travail, salariés permanents ou journaliers... La configuration du groupe de travail et le rôle de femmes est fondamentale pour comprendre la dynamique générationnelle, la répartition du travail et les processus de prise de décision au sein des exploitations familiales.
- **Rôle des femmes, division du travail** entre les sexes, travail invisible-non rémunéré (domestiques, entretenir le ménage, enfants), charge mentale de la prise de décision, carrières des épouses (Terrier et al. 2012), qui décide de la production, comment la faire (Deram 2019).

En outre, nous avons exploré **la fonction forestière** au sein de l'exploitation (fertilité, ombre, conservation, réserve légale, projet futur ou abandon) (Ballon et al. 2016).

Pour l'analyse des trajectoires, nous nous inspirons de Moulin et al. (2008), dont l'analyse est basée sur les changements et les invariants. C'est pourquoi nous analyserons les stades stables de la trajectoire, en mettant l'accent sur la transition (passage d'un stade stable à un autre stade stable) et sur les invariants entre les transitions.

Étape 5 : Atelier

Un atelier collaboratif est réalisé avec la participation des agriculteurs, des représentants des conseils d'action communautaire, du gouvernement, de l'autorité environnementale et des ONG. L'objectif principal est de corroborer les résultats des archétypes au niveau territorial et d'avoir une représentation territoriale des trajectoires.

Cas du Borgou au Bénin : une étude exploratoire pour comprendre la place de la mécanisation dans les trajectoires des exploitations

Les enquêtes menées au Borgou ont pris place dans un contexte de faible documentation des évolutions des systèmes agraires suite à l'essor de la motorisation. Dans ce contexte, ces enquêtes sont exploratoires et l'enjeu est avant tout de caractériser l'accès à la motorisation (propriété d'un tracteur ou d'un motoculteur, prestation de service, part de la traction animale dans les surfaces emblavées) d'un petit échantillon diversifié d'exploitations agricoles et les changements associés dans les systèmes de culture et les exploitations, dans le but d'identifier des indicateurs permettant de caractériser les choix techniques et l'organisation du travail associés à cette motorisation.

Un guide d'entretien semi-directif a été établi portant sur les éléments suivants :

- Caractérisation de la dynamique générale de l'exploitation et ses ressources (foncier, main d'œuvre, équipement, accès aux intrants)
- Caractérisation de l'accès à la motorisation (propriété ou prestation d'équipements motorisés (tracteur, motoculteur, remorque...) ou mécanisés (traction animale))
- Caractérisation des évolutions majeures des systèmes de culture suite à l'accès à la motorisation (évolutions des surfaces et des assolements, des tailles des parcelles et de la place de l'arbre, de l'utilisation d'intrants)
- Pour les propriétaires de tracteurs, estimation de la part relative de la prestation de service dans les revenus, et caractérisation des modalités d'achats des équipements, des modalités de prestation et d'entretien des équipements
- Identification des changements majeurs dans les exploitations en lien avec l'accès à la motorisation (notamment relatifs à la main d'œuvre familiale ou salariée, l'utilisation des crédits de campagne)

L'échantillonnage est volontairement resté très ouvert au démarrage, suivant une méthode boule de neige à partir de contacts fournis par l'Agence Territoriale de Développement Agricole (ATDA) au Borgou. Il s'agissait d'enquêter des exploitations ayant eu l'accès (en prestation ou en propriété) à la motorisation ces 20 dernières années, en essayant des exploitations très variées (de toutes tailles, diversité d'activités agricoles ou non agricoles).

Les données ont été exploitées en reconstituant les étapes de trajectoires archétypales d'accès à la motorisation des différents types d'exploitations de la zone.

Analyse : acquérir une compréhension globale de l'exploitation par une analyse des trajectoires du travail

Dans les deux cas présentés, la description d'une situation concrète permet de discuter d'indicateurs liés au travail.

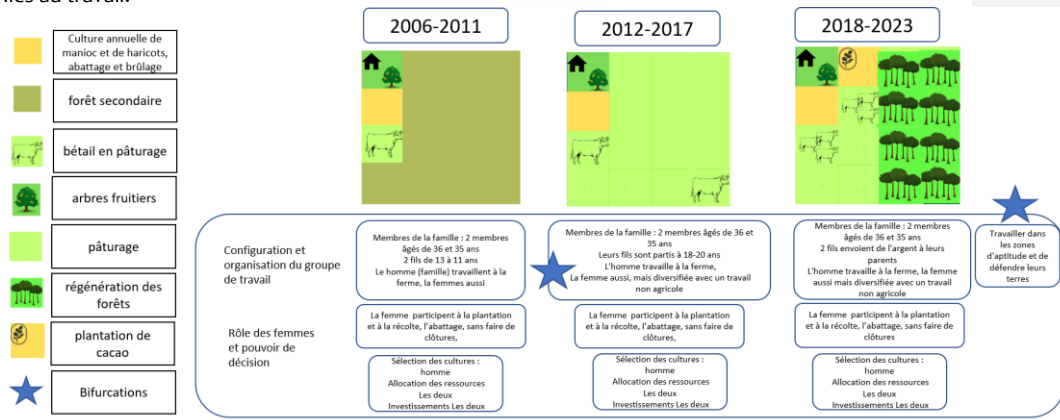



Figure 6: Exemple de trajectoire d'une exploitation familiale en front pionnier évoluant en trois étapes (Vega-Martinez et al, 2023). Initialement, la famille démarre une activité d'abattis-brûlis pour les cultures annuelles et bétail. Les rôles sont répartis entre l'homme et la femme. Dans la deuxième étape, la famille étend son activité en mettant en place un pâturage sur toute l'exploitation. Cependant, la production de bétail reste instable, et les cultures annuelles demeurent la principale source d'autoconsommation. La femme joue un rôle crucial dans la pluriactivité, travaillant comme couturière en semaine et contribuant à l'exploitation le week-end. Les enfants quittent l'exploitation à ce stade. Dans la troisième étape, la femme continue ses activités multiples en ville, mais de manière occasionnelle. Les enfants envoient de l'argent, et le système de production devient stable. Il y a des changements dans la gestion des pâturages, les sols accidentés sont laissés à se régénérer, tandis que les sols plats font l'objet de travaux spécifiques. À chaque étape, l'homme prend les décisions concernant la sélection des cultures, tandis que le couple prend ensemble des décisions sur l'allocation des ressources quotidiennes et les investissements futurs.

Ainsi, pour Guaviare (fig. 6), les indicateurs liés au travail sont la pluriactivité du travail, la configuration du groupe de travail familial, et le rôle des femmes (division du travail). Dans ce cas, ces indicateurs sont ensuite mobilisés pour étudier l'évolution de l'exploitation : l'approche analyse des dimensions du travail pour retracer les changements d'organisation de l'espace dans chaque exploitation et l'utilisation de la forêt. Le travail devient une porte d'entrée pour analyser des facteurs socio-économiques et retracer les changements majeurs de l'exploitation au cours de sa trajectoire, pour identifier les moments de transition.



		1970	1980	1990	2000	2010	2020
Mécanisation	Travail du sol	Manuel (houe)	Traction animale		Labour motorisé (charrue à disques)		
	Accès mécanisation		Propriétaire attelage	Prestation tracteur	Propriétaire tracteur		
	Transport		Charrette		Achat tricycle		
Systèmes de cultures	Surfaces et assolement	Défriche-brûlis, igname, coton, maïs	Augmentation des surfaces de coton et maïs		Augmentation surfaces, début culture en continu (arrêt des jachères)		Autant d'ha de soja que de coton
	Parcelles		Augmentation taille parcelles et déssouchage				
	Intrants		Engrais, semences améliorées	Début herbicides	Herbicides totaux et sélectifs		
Elevage	Bovins	Bovins confiés au Peuhls	Bovins de traits + Peuhls				
Autres revenus		Revenus prestation tracteur					
Force de travail	MO familiale	Grande cour familiale		MO ménage (mari + femmes + enfants), entraide familiale			
	MO extérieure	Travail d'entraide majoritaire		MO salariée temporaire (à la journée ou à la tâche), diminution du travail d'entraide		1 MO salariée permanent + temporaires	




Figure 7. Exemple de trajectoire archétypale pour une exploitation familiale au Borgou, au Bénin. S'agissant d'une famille de primo-arrivants dans la zone, ils pratiquent une agriculture principalement manuelle jusque dans les années 80, où un premier changement intervient avec l'arrivée de la traction animale. La famille acquiert rapidement un attelage, augmente les surfaces et le ménage sort de la cour familiale (diminution de la main d'œuvre familiale, mais présence de groupes d'entraide). Le deuxième changement intervient avec l'arrivée des tracteurs dans les années 2000, entraînant une nouvelle augmentation des surfaces, permise par l'utilisation d'herbicides. A partir des années 2020 la main d'œuvre salariée temporaire devient rare, conduisant à l'embauche d'un salarié permanent (contrat annuel) et l'augmentation de la culture de soja (nécessitant moins de main d'œuvre pour la récolte).

Pour le Borgou (fig. 7), la démarche a pour but de permettre de futurs travaux sur le travail à l'échelle des exploitations agricoles, des systèmes d'activité ou des systèmes de culture. Ainsi, cette analyse a permis d'affiner des indicateurs à mobiliser pour caractériser l'accès à la motorisation et l'organisation du travail dans de futures enquêtes. Les indicateurs identifiés à ce stade sont les suivants :

- Type d'opérations mécanisées, et type d'accès à la motorisation (propriétaire ou prestation, par tracteurs ou motoculteurs)
- Part de travail du sol motorisé par prestation de service ou mécanisé en traction animale dans les surfaces emblavées pour les non-propriétaires de tracteurs
- Importance économique de la prestation de service (le principal intérêt de la possession d'un tracteur d'après les agriculteurs)
- Importance du coton dans l'assolement, et accès aux intrants
- Evolutions des surfaces, des assolements-rotation, et de la taille des EA et des parcelles
- Pour chaque type d'exploitation (selon son accès à la motorisation), caractérisation de l'itinéraire technique (notamment modalités de gestion de l'enherbement) et de l'organisation du travail (répartition des tâches et de la prise de décision) pour les différents types de travailleurs (familiaux ou salariés temporaires ou permanents)

Discussion : Apports et limites des méthodologies de trajectoire du travail

Mobiliser des trajectoires pour étudier les évolutions du travail

Les deux démarches sont issues des fondements conceptuels présentés par Moulin et al. (2008). Ces derniers prennent en compte le contexte interne et externe à l'exploitation et étudient la flexibilité stratégique à travers l'articulation du système famille-exploitation et des phases de cohérence des activités de l'exploitation. Cependant, le travail n'y est décrit qu'en termes de main d'œuvre et d'implications pour la conduite des élevages. Terrier et al. (2012) creusent davantage les modalités de cette articulation famille-exploitation, pensée comme un ensemble unique dans la proposition de Moulin et al. (2008). Leur analyse des lignées agricoles et maisonnées, reliée aux trajectoires des systèmes de production serait très pertinente dans les deux contextes décrits ici, notamment au regard de la complexité des exploitations agricoles familiales en Afrique de l'Ouest (Gastellu 1980), ou bien l'augmentation de la proportion d'actifs non familiaux en Colombie. En revanche, les enquêtes microsociales de Terrier et al. (2012) sont plus lourdes à mettre en œuvre qu'une approche centrée sur les trajectoires d'exploitation.

La combinaison des indicateurs mobilisés au Borgou et au Guaviare, associant l'étude de la force de travail et du niveau de mécanisation, et questionnant le lien aux tâches et aux choix techniques, fait écho à certaines dimensions transversales du travail en agriculture proposées par Dedieu (2019). Cela dépasse une définition du travail restreinte aux jours disponibles.

Acquérir une compréhension globale dans des contextes mouvants

Les deux méthodologies ont pour point commun de viser à acquérir une compréhension globale des exploitations et de leurs dynamiques dans des contextes en évolution ou présentant une forte incertitude sociopolitique, un manque de données agronomiques et des exploitations difficiles d'accès. C'est le cas des fronts pionniers, les exploitations ont tendance à être instables dans ces territoires. L'organisation du travail permet d'analyser les facteurs socio-économiques qui expliquent les changements dans les trajectoires, aboutissant à une analyse nuancée des défis et des opportunités auxquels sont confrontées ces exploitations. Par exemple, si quelqu'un sous-traite la totalité de son travail, on peut dire qu'il est dans une situation extrêmement tendue (phase instable), car la rémunération est faible localement. A l'inverse, celui qui ne cultive que pour son autoconsommation et vend le reste de sa production se trouve dans une situation plus stable car il a pu établir son système de production. Cela permet d'explorer les multiples facteurs qui influencent les trajectoires agricoles, tels que la dynamique de la main-d'œuvre, la gestion de l'exploitation et les rôles des hommes et des femmes.

Pour le Borgou, c'est une faible capitalisation de l'historique agraire récent et un manque de données agronomiques sur l'ampleur du recours à la motorisation et ses conséquences sur les exploitations qui justifie d'utiliser des trajectoires comme méthode exploratoire dans la zone, pour en déduire des indicateurs clés à enquêter à l'avenir. L'étude des trajectoires d'évolution du travail agricole avec ces deux méthodologies permet ainsi de fournir des informations contextualisées sur les situations socio-économiques des exploitations familiales.

L'articulation entre choix techniques et travail reste limitée avec ces méthodes

Bien que ces deux méthodes permettent de répondre aux objectifs qu'elles se fixent (mobiliser les trajectoires d'exploitation pour acquérir une connaissance globale des exploitations), elles restent insuffisantes pour un agronome souhaitant analyser en détail le pourquoi et le comment des choix de systèmes de culture ou de pratiques. En effet, elles explorent finalement assez peu l'articulation entre les dimensions de travail et les choix techniques. Ainsi, bien que présentant les systèmes de culture mis en œuvre, la méthode présentée pour le territoire de Guaviare reste à l'échelle de l'exploitation, et n'a pas pour objectif de détailler des changements des pratiques agricoles et de relier ces décisions.

Pour le Borgou, l'articulation entre l'échelle de l'exploitation agricole et celle du système de culture

dans les trajectoires n'est pas évidente, et nécessite une nouvelle enquête mobilisant les indicateurs identifiés. Cette phase exploratoire a permis de confirmer l'intérêt d'une étude de l'organisation du travail, couplée avec une analyse des itinéraires techniques (intégrant la coexistence de la motorisation et de la traction animale au sein des systèmes de culture). Ce constat met en évidence le besoin de créer ou d'adapter des approches existantes sur l'étude du travail en agriculture pour les agronomes, que nous discutons dans la section suivante.

Discussion : défis et perspectives de recherches sur la question du travail en agronomie.

Comment prendre en compte des spécificités du travail en agronomie dans les démarches d'organisation du travail développées en zootechnie ?

Dans les deux cas présentés, la porte d'entrée pour aborder le travail avec les personnes enquêtées est tangible, c'est-à-dire partant de la description d'une situation concrète pour discuter d'indicateurs liés au travail. On observe que la même réflexion est à l'origine du développement des méthodes d'étude du travail en zootechnie, telles que Bilan Travail ou QuaeWork (Hostiou and Dedieu 2012), c'est-à-dire étudier « qui fait quoi, et comment ».

En effet, en zootechnie système, la caractérisation de l'organisation du travail a été la porte d'entrée de l'étude du travail, y compris dans des démarches d'accompagnement des éleveurs. A partir d'une enquête sur l'organisation de la main d'œuvre (qui fait quoi, et comment) et sur les temps consacrés aux différentes tâches (lait, troupeau, prairies), la méthode Bilan Travail (Dedieu et al 2000 dans Hostiou et al. (2005)) permet l'analyse du fonctionnement des systèmes d'élevage et la quantification du travail relatif à la conduite du troupeau et des surfaces sur une campagne annuelle. ATELAGE (Madelrieux et al 2009) est une approche à l'échelle de l'exploitation mobilisant des concepts de zootechnie système et d'ergonomie, qui représente et évalue l'organisation du travail (et la division du travail en particulier) dans des exploitations d'élevage, permettant d'identifier des schémas d'organisation du travail prenant en compte la diversité des exploitations. Enfin, QuaeWork (Hostiou and Dedieu 2012) permet de combiner ces deux approches pour l'évaluation de l'organisation du travail, en particulier la productivité du travail et la flexibilité, en vue d'identifier des modes de gestion des élevages contribuant à l'atteinte d'objectifs des éleveurs. QuaeWork analyse l'organisation du travail (qui fait quoi, et quand) sur une année entière en étudiant la gestion du troupeau et des cultures, la composition de la main d'œuvre, les équipements et la combinaison des activités.

Si ces méthodes sont pertinentes et mobilisées par des acteurs divers de l'élevage, y compris dans des organismes de conseil, elles n'en restent pas moins très centrées sur le travail d'astreinte. Ces méthodes ne prennent pas beaucoup en considération le travail de saison et l'adaptation des décisions des agriculteurs aux conditions pédo-climatiques. Ces éléments ont été davantage abordés dans l'approche des jours disponibles et du modèle d'action. Cependant, l'opérationnalisation de ces approches d'agronomes sous la forme de la suite du logiciel OTELO présente des limites pour les agriculteurs européens (Delecourt 2018) et n'est pas facilement mobilisable dans d'autres contextes, par exemple dans le cas de la motorisation au nord Bénin.

La thèse de Delecourt (2018) contribue à la réflexion des agronomes en identifiant des informations sur le travail que les agriculteurs mobilisent lorsqu'ils modifient leurs pratiques : performances des opérations, ressources requises, organisation du travail et compétitions entre tâches, et nature ou pénibilité du travail. Cela fournit des pistes pour des outils d'évaluation et l'accompagnement des agriculteurs dans leur transition vers des systèmes plus agroécologiques.

Pour l'agronome, l'étude du travail doit également pouvoir s'adapter aux spécificités des différents types de culture, par exemple les cultures pérennes ou le maraîchage. Soulignons tout de même la complémentarité entre zootechniciens et agronomes travaillant sur les questions de travail, en particulier pour la compréhension des interactions entre systèmes de culture et systèmes d'élevage à l'échelle de l'exploitation agricole (Fanchone et al. 2022) ou du système d'activité (Gasselín et al. 2014). Enfin, il paraît nécessaire de réfléchir à des adaptations des approches existantes pour des

systèmes agraires en transition majeure, comme le cas des fronts pionniers en Amazonie ou de la motorisation des exploitations au nord Bénin. Le travail est un facteur à prendre en compte pour appuyer la transformation des pratiques des agriculteurs et l'organisation technique des systèmes agricoles, ceci pour garantir leur durabilité économique, écologique et sociale (Hostiou et al. 2005).

Considérer les différents types de travailleurs dans l'organisation du travail

L'organisation du travail et la répartition des tâches entre les différents types de travailleurs nécessite d'être mieux comprise pour étudier le travail en tant qu'agronomes. Ces questions n'étaient pas centrales dans les objectifs des deux études, mais ressortent comme cruciales pour comprendre les choix des systèmes de culture.

Une des difficultés pour la réalisation des trajectoires au nord Bénin a été la faible actualisation des connaissances sur le fonctionnement des exploitations familiales dans la zone. En effet, les travaux sur ce sujet sont plus ou moins anciens (Gastellu 1980), le dernier ouvrage de référence sur la question datant de 2007 (Gafsi et al. 2007). Or de nombreux changements s'opèrent (usage des portables, nucléarisation des ménages, migrations de travail ou vers les villes ...) avec également des variations très locales. Un agronome étudiant les questions liées au travail en agriculture a besoin d'une bonne compréhension du fonctionnement des exploitations pour être capable d'identifier les contraintes ou opportunités de travail qui influencent les choix techniques. De ce fait, une des limites des trajectoires d'exploitation au Borgou est de s'adresser uniquement au chef d'exploitation pour recueillir son récit, ce qui revient à considérer le « ménage » comme une boîte noire. Se centrer sur les cultures collectives du ménage permet d'éviter de rentrer dans la complexité de l'organisation des familles : mais de ce fait une partie des activités et des pratiques, notamment celles menées par les femmes, est demeurée imprécise et mal évaluée (Droy et al. 2014).

Ainsi, le rôle des femmes et la part de leur travail est souligné par plusieurs travaux portant sur les exploitations familiales en Afrique, par exemple en soulignant le lien entre charge de travail et nutrition au Bénin (Droy et al. 2014). Cependant les connaissances des agronomes sur les pratiques des femmes restent limitées, alors que la question se pose de savoir si les femmes mettent en œuvre des pratiques différentes des hommes, ou bien davantage de pratiques agroécologiques. De plus, pour bien comprendre les choix techniques (mise en œuvre de pratiques, conception de l'itinéraire technique et du système de culture), l'agronome doit être en mesure de comprendre l'organisation du travail des différents membres du ménage (qui fait quoi, et avec quels moyens ?). Au-delà de la seule répartition des tâches entre travailleurs, la question de la répartition de la pénibilité et de la prise de décision se pose également : quels types de travailleurs vont réaliser les tâches pénibles ? Au Guaviare, la méthode ambitionne d'analyser le rôle des femmes dans les trajectoires agricoles pour vérifier l'hypothèse de la durabilité des trajectoires lorsque les exploitations sont gérées par des femmes.

Cette considération de la répartition des tâches est importante pour adapter l'accompagnement des agronomes en fonction des travailleurs qui effectueront les opérations culturales (pour reprendre l'exemple des agronomes s'adressant toujours au « chef d'exploitation » au Bénin). C'est important à considérer lors de la reconception d'un système pour ne pas désavantager certains travailleurs par une répartition inégale de la charge de travail ou des opérations les plus pénibles ou à risque pour la santé (traitements phytosanitaires). Ces questions se posent également dans d'autres contextes et pour d'autres systèmes de production, on peut par exemple citer le recours aux travailleurs temporaires en arboriculture ou en maraîchage.

Conclusions et perspectives

Nous documentons la mise au point de méthodologies d'enquêtes en agronomie sur le travail dans les exploitations familiales. Nous présentons deux approches en Colombie et au Bénin, où des trajectoires d'exploitation intégrant une analyse du travail sont mobilisées. Ces deux approches permettent d'acquérir une compréhension globale des exploitations dans des territoires en transition. Cependant, malgré les apports d'une approche diachronique des évolutions du travail dans les exploitations, l'articulation entre cette description du travail et les choix techniques (des itinéraires techniques et des systèmes de culture) reste limitée. Il est donc nécessaire de développer des approches d'étude du travail en agronomie système. Mais d'autres disciplines sont plus avancées sur la question du travail en agriculture, il faut donc viser l'interdisciplinarité, notamment avec la zootechnie système qui étudie l'organisation du travail. L'enjeu est alors de parvenir à adapter ces approches d'organisation du travail aux spécificités des objets de l'agronomie système. Un autre enjeu est de parvenir à considérer les différents types de travailleurs dans l'organisation du travail, notamment les femmes dans les exploitations familiales. A long terme, la perspective est de proposer un cadre d'analyse de l'organisation du travail dans les exploitations agricoles en agronomie système (notamment intégrant le travail de saison et/ou les spécificités des systèmes de culture).

Références

- Attonaty IM, Laporte C, Papy F, Soler GS (1987) La simulation de l'organisation du travail comme outil de gestion de l'exploitation agricole : Application à la grande culture. *Etudes et Recherches sur les Systèmes Agraires et le Développement* 10:48. <https://doi.org/2-7380-0009-6>
- Ballon N, Cialdella N, Blanc L, et al (2016) Les capoiéras au prisme des trajectoires des exploitations agricoles. *Cas de Paragominas, État du Para, Amazonie brésilienne*. 20
- Baudron F, Misiko M, Getnet B, et al (2019) A farm-level assessment of labor and mechanization in Eastern and Southern Africa. *Agronomy for Sustainable Development* 39:. <https://doi.org/10.1007/s13593-019-0563-5>
- Carvalho SA de, Pocard-Chapuis R, Tourrand JF (2015) Opportunism and persistence in milk production in the Brazilian Amazonia. *Revue d'Elevage et de Médecine Veterinaire des Pays Tropicaux* 68:61–67
- Cialdella N, Navegantes Alves L (2014) La ruée vers l'« açai » (*Euterpe oleracea* Mart.) : trajectoires d'un fruit emblématique d'Amazonie. *Revue Tiers Monde* 220:119–135. <https://doi.org/10.3917/rtm.220.0121>
- Coquil X, Cerf M, Auricoste C, et al (2018) Questioning the work of farmers, advisors, teachers and researchers in agro-ecological transition. A review. *Agronomy for Sustainable Development* 38:. <https://doi.org/10.1007/s13593-018-0524-4>
- DANE (2005) Censo General 2005 Perfil San José del Guaviare - Guaviare
- Dedieu B (2019) Transversal views on work in agriculture. *Cahiers Agricultures* 28:8. <https://doi.org/10.1051/cagri/2019008>
- Delecourt E (2018) *Prise en compte du travail dans les changements de pratiques vers l'agroécologie : Outils et informations pour l'accompagnement des agriculteurs*. Thèse de doctorat de l'Université Paris-Saclay, AgroParisTech
- Deram J (2019) Maud Simonet, *Travail gratuit : la nouvelle exploitation ?*, Textuel, 2018, 152 p. La nouvelle revue du travail. <https://doi.org/10.4000/nrt.5416>
- Droy I, Pascual C, Bidou J-É (2014) Chapitre 3. Inégalités de genre et vulnérabilité alimentaire au Bénin. In: Guétat-Bernard H, Saussey M (eds) *Genre et savoirs*. IRD Éditions, pp 85–115
- Dumont AM, Baret PV (2017) Why working conditions are a key issue of sustainability in agriculture? A comparison between agroecological, organic and conventional vegetable systems. *Journal of Rural Studies* 56:53–64. <https://doi.org/10.1016/j.jrurstud.2017.07.007>
- Fanchone A, Alexandre G, Hostiou N (2022) Work organization as a barrier to crop–livestock integration

practices: a case study in Guadeloupe. *Agron Sustain Dev* 42:54. <https://doi.org/10.1007/s13593-022-00782-8>

Gafsi M, Dugué P, Jamin J-Y, Brossier J (eds) (2007) *Exploitations agricoles familiales en Afrique de l'Ouest et du Centre*. Editions Quae

Gasselin P, Vaillant M, Bathfield B (2014) Le système d'activité. Retour sur un concept pour étudier l'agriculture en famille. In: Gasselin P, Choisis J-P, Petit S, Purseigle F (eds) *L'agriculture en famille: travailler, réinventer, transmettre*. EDP sciences, Les Ulis

Gastellu JM (1980) Mais où sont donc ces unités économiques que nos amis cherchent tant en Afrique? AMIRA

Hostiou N, Dedieu B (2012) A method for assessing work productivity and flexibility in livestock farms. *Animal* 6:852–862. <https://doi.org/10.1017/S175173111002084>

Hostiou N, Tourrand J-F, Da Veiga JB (2005) Organisation du travail dans des élevages familiaux lait et viande sur un front pionnier amazonien au Brésil. Etude à partir de sept enquêtes « bilan travail ». *Rev Elev Med Vet Pays Trop* 58:167. <https://doi.org/10.19182/remvt.9929>

Houkpatin KOL, Bossa AY, Yira Y, et al (2022) Assessment of the soil fertility status in Benin (West Africa) – Digital soil mapping using machine learning. *Geoderma Regional* 28:e00444. <https://doi.org/10.1016/j.geodrs.2021.e00444>

IDEAM (2023) SAN JOSÉ DEL GUAVIARE. In: <http://bart.ideam.gov.co>. <http://bart.ideam.gov.co/cliciu/guavi/precipitacion.htm>. Accessed 24 May 2023

Lihoussou M, Limbourg S (2022) Towards a sustainable production of maize and soybean in the department of Borgou. *Cleaner Logistics and Supply Chain* 4:100039. <https://doi.org/10.1016/j.clscn.2022.100039>

Madelrieux S, Dedieu B (2008) Qualification and assessment of work organisation in livestock farms. *animal* 2:435–446. <https://doi.org/10.1017/S175173110700122X>

Malanski PD, Schiavi S, Dedieu B (2019) Characteristics of “work in agriculture” scientific communities. A bibliometric review. *Agronomy for Sustainable Development* 39:.. <https://doi.org/10.1007/s13593-019-0582-2>

Mazoyer M, Roudart L (2002) *Histoire des agricultures du monde. Du Néolithique à la crise contemporaine*. Points, Paris

Moulin C-H, Ingrand S, Madelrieux S, et al (2008) Comprendre et analyser les changements d'organisation et de conduite de l'élevage dans un ensemble d'exploitations : propositions méthodologiques. In: Dedieu B, Chia E, Moulin CH, Tichit M (eds) *L'élevage en mouvement. Flexibilité et adaptation des exploitations d'herbivores*. Editions Quae, Paris, France, pp 181–196

Navegantes-Alves L, Poccard-Chapuis R, Huguenin J, et al (2012) Grassland deterioration linked to farm trajectories in the eastern Amazon. *Outlook On Agriculture* 41:195–201. <https://doi.org/10.5367/0a.2012.0100>

Plassin S (2018) *Élever des bovins dans des paysages éco-efficients. Comprendre et modéliser le processus d'intensification dans les fermes d'élevage d'Amazonie orientale brésilienne*

Terrier M, Madelrieux S, Dufour A, Dedieu B (2012) Saisir la diversité des formes d'articulation entre la famille et l'exploitation agricole: une grille de lecture. 25

Tobon JGU (2020) Factores asociados al relevo generacional en la producción agropecuaria familiar, en la zona rural del municipio en San José del Guaviare. MSc Thesis, UniSalle

Villabona MAR (2023) Bridging the gap between ecosystem services conservation and rural landscape development in post- conflict regions: A case study from San José del Guaviare, Colombia. MSc Thesis, Wageningen University

Orienter les pratiques culturales par la recherche d'indicateurs relatifs à la fertilité biologique des sols Témoignage des Chambres d'agricultures



TÉMOIGNAGE

Christophe BARBOT¹, Cédric BERGER^{2*}, Pascal GUILBAULT³, Virginie RIOU⁴, Joëlle SAUTER⁵

Auteur correspondant : cedric.berger@loiret.chambagri.fr

¹ Chambre d'agriculture d'Alsace Contact : christophe.barbot@alsace.chambagri.fr

² Chambre d'agriculture du Loiret Contact : cedric.berger@loiret.chambagri.fr

³ Chambre d'agriculture Nouvelle-Aquitaine Contact : pascal.guilbault@na.chambagri.fr

⁴ Chambre d'agriculture des Pays de la Loire Contact : virginie.riou@pl.chambagri.fr

⁵ Chambre d'agriculture Grand Est Contact : joelle.sauter@grandest.chambagri.fr

Résumé

Différentes démarches sont en cours dans le réseau des chambres d'agriculture pour identifier les indicateurs de qualité des sols et favoriser l'appropriation de ces indicateurs par les agriculteurs qui cherchent à augmenter la vie dans leurs sols. Trois types d'expériences sont ainsi décrites dans ce témoignage collectif de plusieurs chambres d'agriculture. Elles montrent le véritable intérêt des agriculteurs pour la recherche d'indicateurs facilitant le diagnostic de la qualité des sols tout en constatant le manque encore important de références agronomiques pour la mise en place d'actions en faveur de l'amélioration du potentiel des sols.

Introduction

Le diagnostic agro-pédologique constitue une étape incontournable du conseil agricole car il permet d'orienter objectivement les choix de l'agriculteur. Lorsqu'il est réalisé, il est important de pouvoir évaluer la qualité d'un sol sur l'ensemble des trois piliers de la fertilité, physique, chimique, et biologique, en interactions. Toutefois, les connaissances et les références relatives à la gestion de la fertilité biologique, comparativement aux composantes physique et chimique apparaissent en retrait. Or, avec la transition agroécologique, la biodiversité des sols constitue un enjeu central pour l'agronomie ; c'est de surcroît un sujet attractif pour bon nombre d'agriculteurs. C'est pourquoi les Chambres d'agriculture travaillent avec les organismes de la recherche sur des outils de diagnostic et des indicateurs transférables et utilisables sur le terrain.

Changer de paradigme et construire avec les agriculteurs le conseil agronomique de demain

En France, plusieurs réseaux d'observations et d'analyses biologiques des sols ont été mis en place, dans différents territoires. Ces réseaux permettent aux agriculteurs impliqués de mieux comprendre et de mesurer l'impact de leurs différentes pratiques agricoles sur la qualité et le fonctionnement de leurs sols. L'approche collective leur permet de se comparer localement entre eux en se basant sur des indicateurs concrets et objectifs et les incite à expérimenter, à co-construire et à innover sur leurs exploitations pour améliorer la fertilité et la résilience de leurs sols. A terme, ces réseaux pourront constituer des référentiels locaux sur les indicateurs mobilisés.

Exemple en Pays de Loire : partir de diagnostics biologiques du sol pour initier un référentiel local
(Virginie RIOU, Responsable du pôle Sol, Service Agronomie, Chambre d'agriculture des Pays de la Loire)

Suite au CASDAR AgrInnov terminé en 2015, (Encadré n°1), qui a permis d'aboutir à une boîte à outils d'indicateurs validés et utilisables par les agriculteurs pour évaluer la qualité biologique de leur sol, la Chambre d'agriculture des Pays de la Loire a déployé plusieurs groupes « REVA ».

Le Réseau d'Expérimentations et de Veille à l'innovation Agricole (REVA) est constitué de groupes d'agriculteurs réunis autour d'un objectif commun de préservation des sols et de leurs performances agro-écologiques. Cette démarche, initiée par l'Observatoire Français des Sols Vivants, est l'interface entre les agriculteurs, le développement agricole et la recherche fondamentale. Ce réseau a permis la construction et l'utilisation d'outils de mesure de l'impact des pratiques sur la qualité biologique des sols, la rentabilité des pratiques, la qualité des productions. En 2017, plusieurs groupes d'agriculteurs ligériens en cultures et en viticulture se sont engagés dans cette démarche. L'objectif était d'évaluer l'impact de leurs pratiques sur la qualité de leur sol.

Ce diagnostic du sol se base sur 6 analyses et/ou observations différentes :

- L'analyse de sol caractérisant l'état physico chimique du sol :
 - La granulométrie ;
 - Le taux de carbone, azote, rapport C/N ;
 - La détermination du pH, la teneur en calcaire totale et phosphore ;
 - La répartition sur la CEC des cations échangeables (Ca, Mg, K, Na, Al, Mn, Fe) ;
 - La teneur en éléments traces (Cu, Cd, Ni, Pb, Zn).
- L'état structural du sol par un test bêche (Boizard et al, 2019)

Les objectifs sont de caractériser l'habitat des organismes du sol et d'évaluer l'effet du système de culture sur la structure du sol. Le principe est d'observer le sol sur l'horizon 0-20 cm. La surface du sol permettant de repérer la présence d'une croûte de battance et des traces d'érosion. Ensuite, l'extraction d'un bloc de sol permet d'observer la structure interne des mottes (terre fine, structure grumeleuse ou compacte) qui renseigne sur la capacité d'infiltration de l'eau et la pénétration des racines. L'estimation du volume de sol occupé par des zones tassées indique la présence d'obstacles à l'enracinement, à la nutrition des cultures et à la circulation de l'eau notamment. A la fin du test, une grille de lecture identifie la classe du sol : pas de tassement, structure à surveiller, structure compactée avec action corrective à envisager.

- L'évaluation de la dégradation des résidus de culture :

La méthode du LEVAbag^{MD} a pour but d'estimer la dégradation de résidus de culture dans le sol en calculant sa perte en masse au cours du temps. Le principe est d'enfouir pendant 4 mois des sacs de nylon préalablement remplis avec des pailles de céréales. En mesurant la masse sèche avant et après le passage dans le sol, on peut évaluer la capacité des organismes à dégrader cette matière organique dans ce sol. Le positionnement du taux de dégradation sur un référentiel permet de juger si la dégradation des résidus est considérée comme très faible/faible/moyen/fort/très fort.

- L'analyse lombricienne :

L'évaluation de l'activité des vers de terre par leur abondance et leur diversité constitue une indication sur la qualité biologique du sol. Prélevés lors des tests bêches, les vers de terre sont reconnus selon 4 groupes fonctionnels : épigés, épi anéciques, anéciques stricts et endogés. Pour chacun de ces 4 groupes, les nombres d'espèces et sous espèces sont identifiés. Un bilan croisant l'abondance et la diversité permet de positionner le sol sur un référentiel national et indique le niveau de richesse de la parcelle.

- L'analyse microbiologique du sol :

Elle nous informe principalement sur les bactéries et champignons qui sont les micro-organismes les plus abondants et diversifiés du sol. L'abondance totale est mesurée par l'ADN microbien prélevé dans un échantillon de sol. Le rapport champignons sur bactéries et la diversité microbienne nous renseignent sur le fonctionnement biologique du sol comme la minéralisation de

la MO, la dépollution, la stabilité structurale et sur les capacités de résilience du sol en lien avec le système de production.

➤ L'analyse de la nématofaune :

L'analyse est basée sur l'abondance et la diversité des populations de nématodes dans le sol. On distingue les nématodes libres (bactérovores, fongivores, carnivores, omnivores) et les nématodes phytoparasites. Les nématodes libres sont tous bénéfiques pour l'environnement, et indiquent des niveaux d'activité biologique du sol, de perturbation et de qualité de la MO. Pour les nématodes phytoparasites, ils se nourrissent exclusivement sur les racines des plantes et peuvent induire des dégâts sur les cultures. Les indicateurs nématofauniques donnent des informations sur la stabilité du milieu, la complexité des réseaux trophiques et la dynamique des flux de nutriments dans le sol. La synthèse de ces indicateurs livre un diagnostic de sol complet en proposant deux indicateurs de synthèse sur le patrimoine biologique (reflétant l'abondance des organismes présents) et l'assurance écologique de son sol (apportant une notion de résilience).

En l'absence, de référentiel national ou régional sur l'ensemble des indicateurs biologiques, il est intéressant de pouvoir comparer les résultats en groupe sur un même secteur et contexte pédoclimatique permettant plus facilement de mettre en évidence des impacts de pratiques.

Certains groupes ont pu bénéficier de financement leur permettant de répéter ce type de diagnostic à 3 ans d'intervalle. Le premier diagnostic ayant permis de corriger un certain nombre de pratiques et d'avoir une réflexion de reconception de système à partir de ce diagnostic biologique, le deuxième diagnostic permettant de conforter les changements de pratiques apportés ou permettant encore de les faire évoluer. Un certain nombre de ces analyses restent encore des analyses de laboratoire à coût élevé, ce qui reste un frein important au développement en grand nombre de ce type d'analyses afin d'élaborer un référentiel régional fiable.

Encadré n°1 : Témoignage d'un viticulteur ayant participé au CASDAR AgrInnov : « Faire que tout se passe bien dans la vigne pour que tout se passe bien dans la cave »



Alain Boré est viticulteur et vinificateur au Domaine du Fresche à La Pommeraye (49) sur 28 ha en AOC Anjou. Il a participé au projet AgrInnov, curieux d'avoir une approche un peu différente et plus complète que les analyses classiques qui ne donnent pas d'informations sur les « petites bêtes » présentes dans le sol qu'on ne voit pas mais qui ont un rôle prépondérant dans la fertilité des sols. « Le garde-manger peut être plein mais très mal fonctionner, il est donc intéressant d'approcher d'un peu

plus près ce fonctionnement du sol, car un sol vivant, équilibré c'est certainement également un meilleur contrôle des ravageurs et des maladies sur la vigne et derrière moins de soucis en vinification. Bref, si on arrive à faire en sorte que tout se passe bien dans la vigne, tout se passera bien dans la cave. Mon objectif était de pouvoir avoir une tendance globale de l'état de mon sol, j'ai des indicateurs qui sont à un niveau très haut et d'autres à un niveau plus faible. Concernant les nématodes par exemple, j'ai pu voir qu'il pouvait y avoir un risque mais cela ne veut pas dire qu'il va s'exprimer. Je pense qu'il faut rester prudent dans l'interprétation, le sol est un milieu complexe. Je ne m'attendais pas à ce que ces indicateurs me disent de faire ceci et pas cela. Les pratiques, les conditions de sol sont très différentes d'une exploitation à l'autre et certains indicateurs peuvent bouger plus ou moins

rapidement.

Depuis 15 ans, je me suis engagé dans une voie qui me semble plus respectueuse du sol, de la plante et de leur interaction. Mais j'ai l'impression que trop souvent, on a oublié qu'on avait un sol, un milieu vivant, on a voulu le domestiquer en n'en faisant qu'un support mais il faut d'abord le respecter si on veut qu'il permette à la plante de pousser en bonne santé : en vigne, on ne cultive pas une plante en pot ! »

Alain pratique l'enherbement spontané 1 rang sur 2 et sur ces sols argilo-limoneux battants, il voit des effets positifs de cette pratique notamment sur la portance du sol même si par ailleurs il utilise des pneus larges, basse pression, ces sols ne marquent pas au printemps. C'est d'ailleurs sur les rangs enherbés qu'il était très au-dessus de la moyenne (pour des sols de vigne) sur le nombre et la diversité des vers de terre ! L'impact des pratiques sur la fertilité des sols est donc une chose importante à prendre en compte. « Ce type d'analyses, nous donne une tendance et nous engage à poursuivre nos réflexions sur nos pratiques. Malgré tout, en vigne, on est sur des plantes pérennes, un changement de pratiques doit se faire progressivement et sur le long terme. Je ne pense pas que le sol, la vie du sol aime les à-coups. Je pense également que lorsqu'on modifie une pratique cela peut faire bouger beaucoup de choses dans le sol et il n'est pas toujours évident d'évaluer cette complexité pour prendre une décision en termes d'itinéraire technique : le résultat est-il l'indicateur de ma pratique actuelle ou la conséquence de mes pratiques antérieures ? Certainement un peu des deux. De plus, il faut prendre ces résultats pour ce qu'ils sont : une image à un instant T mais les années sont différentes (météo) et nos pratiques évoluent. Il faudrait pouvoir faire un suivi sur plusieurs années pour aller plus loin. »

Exemple de deux démarches collectives engagées récemment dans le département du Loiret pour préserver la ressource en eau.

(Cédric BERGER, Conseiller agro-pédologue, Equipe eau-environnement, chargé de la mission nationale multifonctionnalité des sols, Chambre d'agriculture du Loiret)

Le Contrat Territorial Val Dhuy Loiret et le PTGE Puiseaux Vernisson

Deux réseaux d'observations et d'analyses de la fertilité des sols ont été mis en place à partir de 2020 par la Chambre d'agriculture du Loiret, sur deux territoires à enjeu « Eau » : le bassin versant du Val Dhuy Loiret et celui du Puiseaux et Vernisson.

Sur le périmètre du Val Dhuy Loiret, au sein duquel sont situés trois captages prioritaires approvisionnant la ville d'Orléans, l'enjeu est de préserver la qualité de la ressource en eau. En ce sens, un contrat territorial a été engagé entre les différents acteurs locaux impliqués dans sa gestion. Celui-ci consiste notamment à mettre en œuvre diverses actions pour prévenir tout risque de pollutions par les nitrates et les produits phytosanitaires. La Chambre d'agriculture du Loiret, signataire du contrat, porte le volet pollutions diffuses. Un réseau de vingt-et-une parcelles (douze en grandes cultures, trois en maraîchage, et six « références prairies ») a été mis en place sur ce territoire en 2020-2021. Au total, trente diagnostics ont été réalisés sur ces deux années consécutives car neuf parcelles ont fait l'objet d'un diagnostic initial en 2020 puis d'un suivi de routine restreint à certains indicateurs en 2021 pour aider les agriculteurs à faire directement le lien avec leurs pratiques agricoles d'une année.

Depuis 2023, la Chambre d'agriculture du Loiret intervient sur un autre territoire : le projet de territoire pour la gestion de l'eau (PTGE) Puiseaux-Vernisson. Le diagnostic des sols répond à des objectifs de préservation de la qualité de l'eau mais aussi d'amélioration de la capacité de rétention en eau des sols. Cette année, huit diagnostics de fertilité des sols ont été réalisés.

Sur ces deux territoires à enjeu « Eau », les actions agricoles sont conduites pour accompagner les agriculteurs vers la transition agro-écologique afin de leur permettre d'assurer la multi-performance économique, sociale, et environnementale de leurs exploitations. Parmi ces actions, les réseaux d'observations et d'analyses de la fertilité des sols constituent une bonne entrée auprès des agriculteurs pour initier une transition de leurs systèmes de cultures.

Ils permettent par ailleurs de diagnostiquer et de suivre la fertilité et la qualité de leurs sols à l'échelle de ces territoires.

Au sein de ces réseaux, deux fonctions des sols sont principalement étudiées avec les agriculteurs :

- la fonction de production agricole (production primaire) qui intéresse en premier lieu les agriculteurs mais aussi les populations qu'ils approvisionnent,
- la fonction de régulation de l'eau (filtration, épuration, et stockage) qui concerne également l'ensemble des citoyens.

Un diagnostic complet de « l'état de forme » des sols

Les sols sont auscultés minutieusement afin d'établir un diagnostic : sondage à l'aide d'une tarière pour déterminer la nature des sols et leur fonctionnement (carte d'identité du sol), tests « bêche » complétés par un test à l'aide d'une tige pénétrométrique pour observer la structure des sols et les éventuelles zones de compaction (examen du sol), analyses lombriciennes pour évaluer rapidement et simplement la fertilité et le patrimoine biologique des sols (abondance et diversité des vers de terre) et échantillonnages de terre en vue de la réalisation d'analyses complémentaires en laboratoire, telles une prise de sang, pour valider le diagnostic et suivre son évolution (fractionnement des MO, biomasse microbienne, activités biologiques,...).



Deux alliés visibles de l'agriculteur : le carabe et le ver de terre anécique

Les réseaux d'observations et d'analyses de la fertilité des sols, Pour quoi ?

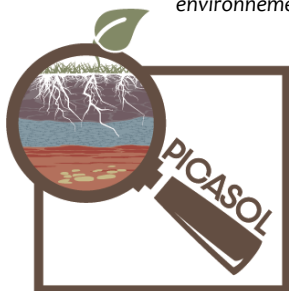
Ces réseaux territorialisés permettent dans un premier temps de sensibiliser les agriculteurs à l'intérêt de maintenir leurs sols en bonne santé. Ils mettent en lumière l'incidence de leurs différentes pratiques agricoles sur la fertilité biologique et le patrimoine biologique de leurs sols, et leur fournissent des outils et méthodes pour leur permettre de mieux observer leurs sols sur leurs exploitations.

Les agriculteurs reçoivent d'abord un conseil individuel. Ils partagent ensuite leurs résultats en groupes mixant les différents types d'agricultures (agriculture conventionnelle "A", agriculture biologique "AB", agriculture de conservation des sols "AC"), avec l'éclairage de spécialistes des bioindicateurs mobilisés. Chacun peut ainsi se positionner par rapport au groupe. Les agriculteurs échangent ensuite entre eux sur leurs pratiques les plus vertueuses autour des thèmes d'arbitrage suivants : travail du sol, rotation et couverts végétaux, fertilisation et amendements, protection phytosanitaire. A l'issue de cette séquence collective, chaque agriculteur repart avec son plan d'actions personnalisé à mettre en œuvre sur sa ferme.

A l'avenir, ces réseaux aideront les agriculteurs à faire évoluer ensemble leurs pratiques agricoles en groupes de travail en combinant lorsque c'est possible celles qu'ils identifient comme étant les plus agro-écologiquement efficaces pour (re)concevoir des systèmes de production durables sur leurs exploitations, dans leurs contextes agro-pédo-climatiques. Ils ouvriront la voie à l'expérimentation et à l'innovation sur leurs exploitations pour optimiser le fonctionnement de leurs systèmes et ainsi mieux répondre aux enjeux de durabilité de l'activité agricole et de préservation de la ressource en eau sur les territoires du Contrat Territorial Val Dhuy Loiret et du PTGE Puisieux Vernisson.

Avec PICASOL, les Chambres (re)mettent la biologie au cœur de la fertilité des sols

(Christophe BARBOT, Conseiller spécialisé mission déchets et matières organiques, Service agronomie environnement, Chambre d'agriculture d'Alsace)



La fertilité des sols ne relève pas uniquement de la chimie ! Voilà le point de départ du projet Picasol, acronyme de Promouvoir des Indicateurs Caractérisant l'Activité biologique des SOLs. Financé par le Casdar, via l'appel à projets Reflex2020, il a mobilisé cinq Chambres régionales d'agriculture⁹⁶ de mars 2021 à 2022, ainsi que les Chambres départementales de Gironde et d'Alsace. Dans le réseau des Chambres d'agriculture, l'évolution de la logique de réflexion est en cours.

Remettre la biologie des sols au premier plan

Les porteurs de ce projet estiment que la fertilité biologique et physique est souvent oubliée, au profit de la composante chimique du sol. Or, ces trois composantes sont liées les unes aux autres, et si l'une présente un dysfonctionnement, cela impacte directement les deux autres. À l'inverse, chacune participe au bon fonctionnement des deux autres. Le projet Picasol a donc pour vocation de remettre en lumière la biologie des sols, et de proposer des formations et outils pour aider les conseillers de Chambre d'agriculture à mieux l'intégrer dans leur travail.

Plusieurs sillons ont été tracés. Une enquête a été menée auprès des conseillers de Chambres, d'un côté, et des ateliers d'échanges ont été organisés avec des agriculteurs de l'autre. Objectif : évaluer au mieux leurs niveaux de connaissance et leurs attentes et besoins respectifs. Parmi les chefs d'exploitations, deux catégories ont été distinguées : les « novices » et les « confirmés », ayant travaillé des enjeux liés au sol à travers des démarches collectives (Dephy, Groupes 30 000). Les filières viticoles, arboricoles et grandes cultures étaient représentées. Ces travaux ont montré que dans de nombreux cas, la logique N-P-K reste ancrée sur le terrain, et ont confirmé la nécessité de réviser les modes de raisonnement.

Bibliographie, enquête et ateliers

Ces ateliers révèlent que les exploitants interrogés se disent intéressés par de l'accompagnement individuel sur la fertilité du sol, mais restent attachés au format des animations collectives. Par ailleurs, suivant le type de cultures dans lequel ils sont spécialisés, les interrogations ne sont pas les mêmes. Elles tournent par exemple davantage autour des apports de matières organiques en grandes cultures et des couverts végétaux en arboriculture.

En parallèle, un travail bibliographique a été réalisé, recensant un vaste éventail d'indicateurs et outils dédiés à la mesure de la fertilité biologique des sols, dont 32 ont été retenus et intégrés dans un « outil d'aide aux choix », destiné aux conseillers. Ces indicateurs ont été répartis selon deux typologies : par caractéristique de sol à évaluer, ou par type d'usage.

Les conseillers sont invités à naviguer parmi les 32 indicateurs et outils de l'aide aux choix, présentés sous forme de fiches. Chaque fiche présente des ouvertures faisant le lien avec les pratiques agricoles favorables à la biologie des sols. Si certains indicateurs s'appuient sur des protocoles très visuels, réalisables par tout un chacun, d'autres nécessitent des compétences ou équipements spécifiques. Pour ceux-ci, une liste de laboratoires d'analyses est suggérée.

⁹⁶ La Chambre d'agriculture de Nouvelle-Aquitaine en tant que pilote, et celles d'Auvergne-Rhône-Alpes, Centre-Val de Loire, Grand Est et Provence-Alpes-Côte d'Azur.

Un outil d'aide aux choix, deux typologies

Les 32 indicateurs issus du travail bibliographique de Picasol sont classés selon deux entrées :
PAR CARACTÉRISTIQUE DU SOL À ÉVALUER :

- Composition et transformation de la matière organique.
- Structure du sol.
- Végétation et enracinement.
- Faune du sol.
- Biomasse microbienne.
- Activité microbienne.

ET CLASSEMENT PAR USAGE :

- Outils de terrain permettant de réaliser des mesures et/ou des analyses *in situ*.
- Outils de conseil et diagnostic.
- Outils de recherche en cours de vulgarisation.
- Outils d'acquisition de références.

Agriculteurs, conseillers : des formations pensées au cas par cas

Parmi les livrables du projet Picasol, figurent deux types de formations construites selon la cible visée. Pour les agriculteurs, elle se décompose en deux modules : cinq heures de formation en ligne, sous forme de vidéos et de quiz, dans un premier temps, avant une demi-journée, sur le terrain, avec le conseiller de Chambre. Ce dernier bénéficie en amont de son propre circuit de formation, basé sur 8 heures de formation à distance auxquelles s'ajoutent 14 heures de formation sur le terrain et en salle, comprenant des exercices de diagnostics de différents ordres : physique, physico-chimique, biologique et identification lombricienne.

Premiers conseillers et agriculteurs formés en 2023

Picasol s'est achevé à la fin de l'été 2022, mais il laisse un héritage à faire fructifier. Si l'outil d'aide aux choix est un livrable directement exploitable, des formations mises au point lors du projet ne demandent qu'à être valorisées. La tête de réseau, Chambres d'agriculture France, a débloqué une enveloppe, issue du Fonds national de solidarité et de péréquation (FNSP2), pour les concrétiser. Une première session pour les conseillers des Chambres d'agriculture a eu lieu fin mars 2023 en Nouvelle-Aquitaine, et les suivantes sont prévues en Alsace et en Centre-Val de Loire à l'automne. Les régions impliquées dans Picasol sont naturellement plus engagées, mais ces formations régionales sont ouvertes à tous les conseillers des Chambres d'agriculture. Une réunion nationale était organisée le 6 avril 2023 pour leur donner de la visibilité. Ces formations sont également proposées au catalogue de Resolia, le service commun de formation et d'accompagnement du réseau des Chambres d'agriculture. Une première formation dédiée aux agriculteurs a eu lieu au printemps 2023 dans le Loiret. Cette formation mixte à distance, en salle puis sur le terrain a réuni un groupe d'agriculteurs appartenant tous à une même petite région agricole (Beauce). D'autres sessions locales suivront également sur l'ensemble du territoire Français.

En conclusion

Principalement articulé autour des dimensions chimiques et physiques, le conseil agricole, en matière de fertilité des sols, a quelque peu négligé les équilibres biologiques qui s'y jouent. Pour rectifier le tir, les Chambres d'agriculture se sont fortement impliquées dans les différents projets CASDAR ainsi que dans la démarche REVA, en résonnance avec les fortes et vives motivations et attentes des agriculteurs, viticulteurs, arboriculteurs ou maraîchers.

Lorsque les diagnostics de fonctionnement biologique des sols, basés sur différents bioindicateurs sont territorialisés, leurs résultats aident les agriculteurs à identifier collectivement dans leur contexte pédoclimatique et économique les pratiques à mettre en œuvre pour préserver, voire

améliorer le potentiel sol. Ces diagnostics peuvent donc être utilisés par des groupes d'agriculteurs comme supports à une reconception de leurs systèmes de cultures, en cohérence avec leurs attentes et leurs objectifs.

Toutefois, la dynamique impulsée notamment avec les indicateurs identifiés ne peut masquer que beaucoup reste à faire en matière de références agronomiques relatives à la fertilité biologique des sols.

Références

Boizard, H., Peigné, J., Vian J.F., Duparque, A., Tomis, V., Johannes, A., Métais, P., Sasal, M.C., Boivin, P. et Roger-Estrade, J., 2019. Les méthodes visuelles d'évaluation de la structure du sol au service d'une démarche clinique en agronomie. *Agronomie, Environnement et Sociétés*, 9:2, 55-76, www.agronomie.asso.fr

revue-sesame-inrae.fr/agrinov-une-demarche-de-science-participative-des-resultats-scientifiques-2/

<https://revue-sesame-inrae.fr/agrinov-reva-un-reseau-pour-experimenter-de-bonnes-pratiques-agricoles-3/>

<https://comifer.asso.fr/wp-content/uploads/2023/06/Action-PICASOL-2022.pdf>

Pour en savoir plus :

Bispo A., Grand C., Galsomies L., 2009. Le programme ADEME "Bioindicateurs de qualité des sols" : Vers le développement et la validation d'indicateurs biologiques pour la protection des sols. *Etude et Gestion des Sols*. 16(3/4). 145-158.

Bispo A., Jolivet C., Ranjard L., Cluzeau D., Hedde M., Pérès G., 2017. Mise en place d'outils et de bio-indicateurs pertinents de la qualité des sols. *Sols Vie Souterr. Enjeux Majeurs En Agroécologie* 175–20

Construction et déploiement de l'agronomie dans et par la formation – Traits saillants de son évolution et enjeux pour l'avenir

Thierry Doré¹, Jean-Jacques Gailleton^{2*}, Philippe Prévost³, Nadia Cancian⁴, Jacques Wéry⁵, Antoine Messéan⁶ et François Papy⁷

Auteur correspondant : philippe.prevost@agreenium.fr



TÉMOIGNAGE

¹ Université Paris-Saclay, AgroParisTech, INRAE, UMR Agronomie

² Ex-Inspecteur d'agronomie - DGER

³ Agreenium

⁴ ENSFEA

⁵ Institut Agro

⁶ INRAE ⁷ Académie d'Agriculture de France

Un an après la parution de l'ouvrage « La fabrique de l'agronomie, de 1945 à nos jours », l'Association française d'agronomie a organisé une série de six webinaires mobilisant les auteurs des chapitres de la seconde partie de l'ouvrage, celle portant sur « La dynamique sociale ». Cette série de rencontres a permis d'échanger sur la place des différents métiers d'agronomes dans la construction de l'agronomie. Ce texte est issu des interventions et les échanges du [webinaire du 2 juin 2023](#) portant sur la formation.

Résumé

La formation en agronomie a été au cœur de la construction de la discipline, avec une fonction d'organisation du corpus conceptuel et méthodologique de la discipline à des fins d'élaboration du savoir à enseigner. Comment les enseignants d'agronomie ont-ils confronté les savoirs issus de la recherche et ceux issus des métiers d'ingénieurs et de techniciens pour permettre l'opérationnalité des concepts et des outils produits par la science agronomique ? Comment les différentes voies de formation ont-elles contribué, chacune à leur façon, à la diffusion des savoirs agronomiques ? Et quelles sont les conditions à réunir pour que les agronomes répondent dans le futur aux enjeux des transitions agricoles, notamment celles relatives aux contextes institutionnels dans lesquels les agronomes évoluent, et aux interactions entre les différents acteurs ? Telles sont les principales questions abordées dans cet article.

Introduction

T. Doré introduit le webinaire en rappelant que l'ouvrage est constitué de deux parties, une première partie qui traite plutôt du contenu conceptuel et méthodologique de la discipline, et une seconde partie qui traite davantage de l'interaction de la discipline avec quelques grands domaines d'action dans la société. Dans ce webinaire, ce sont les relations de l'agronomie avec la formation qui sont discutées, qu'il s'agisse de la formation initiale dans l'enseignement supérieur et l'enseignement secondaire agricole, ou de la formation continue.

Les auteurs du chapitre sur la formation proposent une synthèse en distinguant trois périodes dans l'évolution de la discipline agronomie :

- La construction de l'agronomie dans les années 1970, phase de cristallisation de la discipline,
- La formalisation de l'agronomie comme discipline agronomique, dans les années 1980-2000, au-delà des cercles dans lesquels la discipline avait été créée, avec une dimension formation et une dimension recherche, qui interagissent de manière importante, et qui en même temps tiennent compte des évolutions de la société,

- Et à la fin des années 2000, la remise en chantier de ce qu'est l'agronomie, initiée et stimulée par les attentes en matière de production scientifique, mais également les attentes en matière de formation des futurs agronomes.

La construction de l'agronomie dans les années 1970

T. Doré aborde le premier temps, en précisant que dans les années 1970, l'agronomie s'est d'abord construite au sein de l'enseignement.

Les trois moteurs de la construction de l'agronomie par l'enseignement

C'est historiquement factuel, l'agronomie a été créée dans des cercles d'enseignement et notamment à l'Institut National Agronomique Paris-Grignon (INA P-G), à la chaire d'agronomie, parce que les enseignants avaient trois préoccupations de formation :

- Il s'agissait de former des ingénieurs, c'est-à-dire des gens qui allaient agir, ceci au sein d'une école d'ingénieurs avec une formation davantage finalisée par l'acquisition de compétences que dans une formation universitaire. En se référant à la définition de l'ingénieur dans la Commission des Titres d'Ingénieurs, l'ingénieur a pour fonction de résoudre ou contribuer à résoudre un certain nombre de problèmes. L'objectif premier de la formation n'était donc pas d'accumuler des connaissances mais d'avoir la capacité d'agir en situation. Dès le départ, l'agronomie a ainsi inclus une dimension ingénierie et la prise en compte des objets d'étude de l'action, en particulier celle de l'agriculteur ;
- Et puisqu'il s'agissait de former des gens pour agir, il fallait être capable de maîtriser les méthodes de diagnostic sur des situations agricoles. Au même titre que les médecins hospitaliers font de la recherche en relation avec la clinique, les futurs ingénieurs ou les futurs chercheurs agronomes devaient être en mesure de produire des diagnostics sur des situations cliniques dans le domaine de la production végétale. Ce besoin a engendré la production de nombre de concepts et outils permettant de contribuer à résoudre des problèmes de terrain, et a donc favorisé la cristallisation de l'agronomie ;
- Le troisième moteur de la construction de l'agronomie dans l'enseignement est lié au besoin des ingénieurs de traiter de questions posées à différentes échelles. Les deux premières échelles imbriquées étant l'échelle de la parcelle agricole et celle de l'exploitation agricole, cela a amené l'agronomie à traiter d'emblée simultanément plusieurs niveaux. Ultérieurement, le niveau du territoire s'est ajouté, plutôt après les années 1970. Cet emboîtement parcelle-exploitation-territoire a été ainsi le fait notamment d'un besoin en enseignement.

Vers une vision unifiée de la discipline

Finalement, autour de ces trois moteurs principaux, les besoins de l'enseignement ont amené à une certaine structuration de la discipline. A la fin des années 1970, l'ensemble des concepts et outils qui s'était progressivement construit a permis d'unifier la vision de la discipline. Le schéma de la figure 1, produit par M. Sebillotte en 1979, présente l'emboîtement des différents niveaux, en partant en bas du niveau le plus fin, la parcelle agricole (voire même la station parcellaire), pour aller jusqu'au territoire, à l'organisation dans l'espace. Et au milieu le concept central est le système de culture, rattaché à l'échelle de l'exploitation agricole.

Cette vision unifiée a été portée dans les enseignements mais la dimension systémique et les différents objets d'étude emboîtés ont également été consolidés par un portage au niveau de la recherche. Cela a permis d'éviter l'isolement au sein de la formation et une reconnaissance comme discipline scientifique. La dialectique formation-recherche a ainsi été très importante dans la construction de la discipline agronomie.

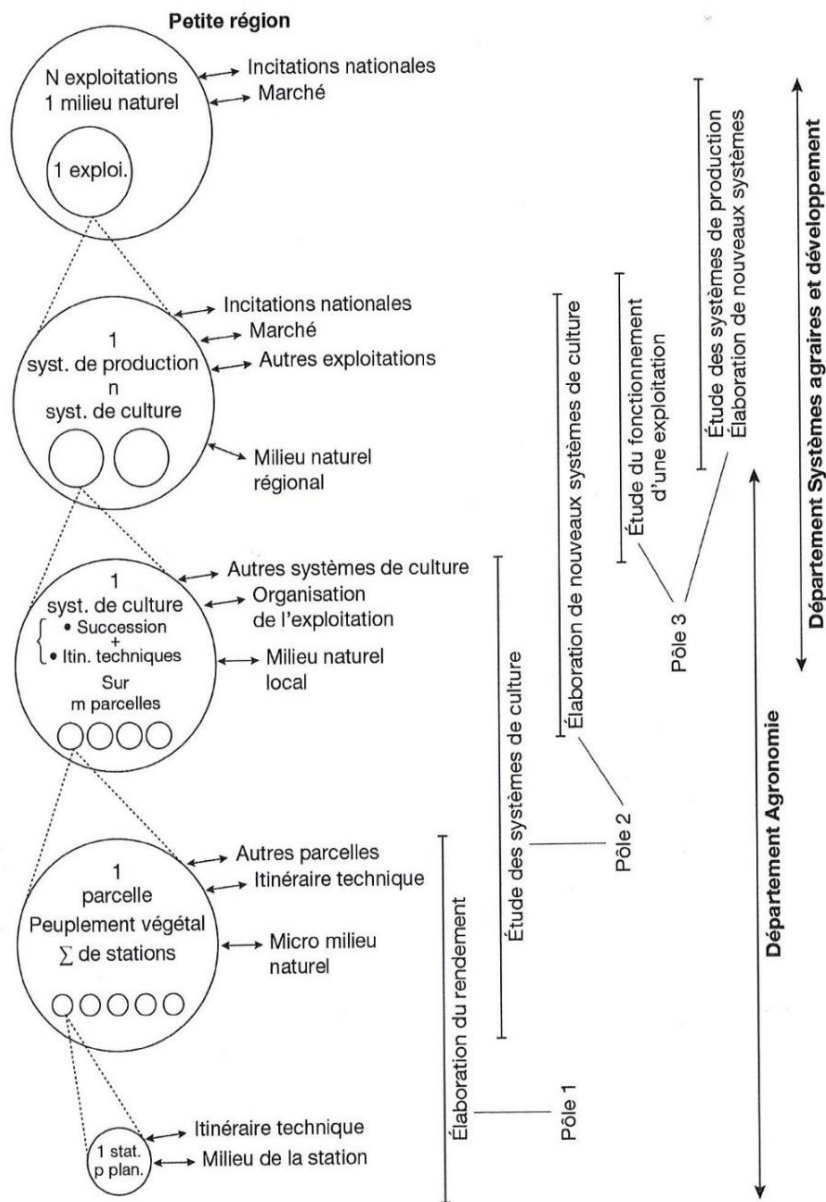


Figure 7.1. Emboîtement des objets de l'agronomie, thématiques de recherche afférentes pour les unités de recherche de l'Inra associées à la chaire d'agronomie de l'INA P-G, et positionnement dans les deux départements de l'Inra (Sebillotte, 1979).

Figure 1 : Représentation des objets de l'agronomie (M. Sebillotte, 1979, repris dans Boiffin et al., 2022, Quae)

L'acquisition des attributs d'une discipline académique dans les années 1980-2000

T. Doré introduit le deuxième temps d'évolution de l'agronomie sur la période étudiée dans l'ouvrage, à savoir les années 1980-2000. A partir du début des années 1980, la discipline agronomie a évolué en se reliant aux politiques publiques, en particulier celles de formation au niveau du ministère en charge de l'agriculture.

Le rôle des politiques publiques : agriculture, éducation et recherche

L'existence des écoles nationales supérieures agronomiques est historiquement l'expression d'une volonté politique quant à la formation des futurs ingénieurs, dans le cadre d'une volonté de modernisation de l'agriculture. La création de nouvelles écoles jusqu'au début des années 1980 a permis d'élargir les publics formés en agronomie, avec une convergence progressive des finalités de formation et des méthodes d'enseignement. Le rythme d'évolution de l'enseignement, passant de différentes formes de phytotechnie à l'agronomie avec une vision plus scientifique, a été différent selon les établissements, en particulier selon l'ancrage local possible sur les dispositifs de recherche en agronomie, principalement l'INRAE : la dialectique formation-recherche a pu se produire de manière plus ou moins profonde et rapide selon la répartition géographique des centres de recherche sur le territoire national.

P. Prévost poursuit le propos sur le rôle des politiques publiques dans le développement de la formation continue. La politique de développement agricole et les politiques de formation ont favorisé à cette époque la diffusion des savoirs agronomiques, que ce soit pour l'installation en agriculture, avec l'exigence d'un diplôme reconnaissant la qualification pour bénéficier des aides à l'installation en l'agriculture, ou dans le renforcement de capacités, avec l'opération emblématique du cycle de formation continue des conseillers agricoles de l'opération « Relance agronomique » des années 1980-1990. Ce cycle de formation continue, initié dans la période de création des chambres régionales d'agriculture, lors de la première phase de décentralisation, a permis de former la majorité des conseillers agricoles des services agronomiques de l'échelon régional (devenus par la suite services agronomie-environnement). Ce fut alors une véritable opportunité pour la diffusion des savoirs agronomiques produits par l'enseignement supérieur dans les années 1970.

Dans l'enseignement technique agricole, J.J. Gailleton insiste également sur le poids des politiques publiques, le Ministère chargé de l'agriculture ayant toujours mobilisé de façon volontariste le dispositif de l'enseignement secondaire agricole pour accompagner les politiques agricoles. Durant cette période des années 1980-2000, le fait majeur a été la loi Rocard de 1984, à la suite des Etats généraux du développement de 1982, qui a engendré une rupture nette dans l'enseignement de l'agronomie, en passant de la phytotechnie à l'agronomie. Le changement a été possible grâce, à la fois, à une réforme institutionnelle structurelle, avec l'introduction de modules de formation pluridisciplinaire et du contrôle continu, et à une réforme pédagogique, appuyée par de nombreux travaux d'expérimentation menés depuis la fin des années 1970, en particulier la recherche-action sur les qualifications professionnelles, qui a conduit à la contextualisation des savoirs à enseigner. Pour l'enseignement de l'agronomie, cela s'est traduit par l'identification d'un certain nombre d'opérations clés qui permettent la maîtrise du processus productif : l'observation du milieu, l'évaluation-diagnostic, la prise de décision à court terme, mais aussi la compréhension des objectifs des agriculteurs au niveau de la parcelle et de l'exploitation. Ce passage de la phytotechnie à l'agronomie s'est prolongé tout au long des années 1990 avec l'intégration progressive de nouveaux concepts autour de l'environnement, de la durabilité, du territoire et de la multifonctionnalité de l'agriculture, en lien avec l'évolution du règlement européen sur les mesures agroenvironnementales et la loi d'orientation agricole de 1990.

L'agronomie, une discipline identitaire de l'enseignement agricole

P. Prévost précise que cette période correspond à l'acquisition d'un certain nombre d'attributs d'une discipline académique, et l'agronomie est reconnue aujourd'hui comme une discipline identitaire de l'enseignement agricole. Un des premiers éléments de reconnaissance d'une discipline académique est le fait d'avoir des enseignants dédiés à cette discipline. C'est dans cette période qu'ont été créés les corps d'enseignants-chercheurs en agronomie dans les écoles supérieures du ministère de l'agriculture et de professeurs certifiés (PCEA) ou professeurs de lycée professionnel (PLPA) agronomie-productions végétales dans les lycées agricoles. Ces corps d'enseignants ont été créés par équivalence avec le ministère de l'éducation nationale. Ces enseignants ont remplacé progressivement les ingénieurs d'agronomie qui assuraient l'enseignement de phytotechnie depuis la fin des années 1960. Le parallélisme n'a pas été total avec l'Education nationale, du fait de la tentative échouée de création d'un corps d'agrégés d'agronomie, la société des agrégés refusant d'avoir une agrégation dans une discipline biotechnique.

T. Doré ajoute que la reconnaissance universitaire de la discipline s'est également réalisée à cette période, même si elle a été progressive et parfois difficile. Car si historiquement l'emploi du terme agronomie existait dans certaines universités, c'était le plus souvent avec des acceptions différentes de celles qui prévalaient dans les écoles d'ingénieurs. Un élément ayant permis le rapprochement entre les écoles et les universités a été la capacité de certaines écoles à délivrer le doctorat. La délivrance de thèses en agronomie a ainsi été possible à partir des années 1980, ce qui a conduit à une reconnaissance disciplinaire, et ce d'autant plus facilement qu'un certain nombre de DEA puis de master sont apparus, la plupart en co-habilitation entre les écoles et les universités à partir des années 1990. Enfin, la question s'est également posée pour l'habilitation à diriger des recherches (HDR) ; là encore, le nombre d'établissements universitaires qui ont délivré des HDR en agronomie a progressivement augmenté, ce qui a participé à une forme d'universitarisation de la discipline, même s'il n'existe pas de section agronomie au sein du conseil national des universités (CNU).

Au-delà des attributs académiques, l'agronomie a construit son identité disciplinaire par ses démarches didactiques et pédagogiques. Cela est particulièrement le cas dans l'enseignement technique agricole. J.J. Gailleton illustre la dynamique d'innovation pédagogique dans l'enseignement d'agronomie par sa capacité à favoriser les approches systémiques et pluridisciplinaires pour l'enseignement des objets complexes :

- Les méthodes pédagogiques développées pour former au fonctionnement de l'exploitation agricole, avec la méthode d'approche globale de l'exploitation agricole (fondée à la fois sur l'approche systémique et sur la théorie de la décision), la méthode IDEA (Indicateurs de durabilité de l'exploitation agricole), les diagnostics multicritères ou l'approche spatiale de l'exploitation agricole ;
- l'approche territoriale, qui a commencé très tôt dès les années 1970 avec l'étude du milieu (approche écologique), mais qui a pris une importance croissante à partir des années 1990, avec une approche multidimensionnelle et systémique du territoire local, associée à la notion de développement durable, et ayant fait l'objet de déploiement de méthodes pédagogiques spécifiques, comme le diagnostic territorial et la lecture du paysage.

Le besoin de penser à nouveau l'avenir de l'agronomie, depuis les années 2010

A partir des années 2010, un certain nombre de questionnements ont interrogé l'avenir de la discipline.

L'agronomie, une discipline en tension, entre écologie et technologie, entre savoirs scientifiques et savoirs pratiques

T. Doré considère que deux forces, opposées, entre les années 2000 et 2010, ont créé une tension dans la discipline :

- d'une part la biologie fondamentale, et particulièrement la biologie moléculaire végétale, a donné l'impression d'un écart grandissant entre l'agronomie et la production de connaissances fondamentales ;
- d'autre part l'apparition du terme agroécologie a amené une interrogation sur le positionnement de l'agronomie, et d'aucuns ont considéré que l'agroécologie remplacerait l'agronomie. Il a ainsi fallu que l'agronomie identifie la façon dont elle pouvait être différente de l'agroécologie et contributrice dans une certaine mesure de cette dernière.

P. Prévost rappelle que ces tensions ont fortement impacté l'enseignement d'agronomie, et cela s'est traduit par le développement de nouveaux champs de recherches en didactique, initiés dans les sciences biotechniques, pour se développer ensuite dans les autres secteurs de l'enseignement général. Ainsi, le développement de la didactique professionnelle a permis de mener un travail d'identification et d'analyse des situations professionnelles agricoles, permettant de considérer la diversité des savoirs à prendre en compte dans la pratique professionnelle, ce qui est fort utile pour le développement des démarches agroécologiques. Et l'autre courant de recherche didactique, celui des questions socialement vives, initié dans les années 1990 avec les interrogations initiales sur le clonage animal, s'est fortement développé lors des débats sur les Organismes Génétiquement Modifiés (OGM) dans les années 2000 puis sur la question des relations entre pesticides et santé depuis le Grenelle de l'environnement en 2008.

J.J. Gailleton illustre cette tension en précisant comment l'enseignement de l'agronomie a été confronté aux tensions sociétales des années 2000 (en particulier celles relatives aux OGM) et à l'agroécologie, dans l'enseignement technique. Ainsi, à partir de 2014, l'incitation à l'agroécologie dans l'enseignement agricole, a été très forte, avec des plans nationaux successifs « d'Enseigner à produire autrement (EPA) ». Pour répondre à ces nouveaux enjeux, de nombreux changements sont à opérer dans la manière de produire, ou encore la prise en compte d'un contexte incertain (climatique, réglementaire...). Cela interroge fortement les contenus d'enseignement, tant dans les référentiels de formation que dans l'évaluation, car les savoirs scientifiques sont instables et en pleine évolution. Cela change l'approche didactique et pédagogique, car il faut désormais aller au-delà de la transmission de savoirs robustes pour travailler avec les élèves sur les transitions, les trajectoires de changement des pratiques, l'élaboration de scénarios... Cela engendre plusieurs conséquences dans l'enseignement d'agronomie : éviter un empilement de connaissances au profit de capacités à agir, donner à voir la diversité des manières de produire, et proposer encore davantage de situations pédagogiques permettant des mises en situation. C'est donc une façon d'enseigner plus complexe, avec un changement du rôle de l'enseignant : de sachant il devient accompagnant dans une démarche de co-construction des savoirs. Cela nécessite un fort accompagnement des enseignants, mais qui offre des perspectives passionnantes.

L'agronomie, une discipline en extension, avec des objets de plus en plus diversifiés à enseigner/apprendre

Au-delà de la tension créée par le contexte sociétal, P. Prévost précise que l'agronomie se trouve aussi face à l'extension de son périmètre, avec des objets de plus en plus diversifiés et complexes.

Sur le plan des échelles, au-delà des objets et des niveaux d'organisation initiaux (parcelle-exploitation agricole-territoire local), on voit que le développement d'un champ de recherche en agronomie globale, traitant d'échelles régionale à planétaire pour aborder des questions de flux dans les cycles biogéochimiques ou d'externalités négatives (ou positives) comme l'émission de gaz à effet de serre, engendre de nouveaux objets d'enseignement. De même, sur le plan des interactions de la production agricole avec l'alimentation, et désormais avec les questions de santé, des objets d'étude comme les systèmes agri-alimentaires, le rôle du microbiote (du sol à l'intestin humain), les attentes sociétales, sont des sujets que ne peut ignorer l'enseignement d'agronomie. Enfin, avec les défis du changement climatique et d'effondrement de la biodiversité, l'accompagnement à la transformation de l'agriculture que doit assurer l'enseignement demande également à l'enseignement d'agronomie d'élargir le champ de compétences des conseillers formés, en particulier pour le développement de compétences psychosociales comme l'écoute, l'animation de collectifs, la médiation multi-acteurs.

Par ailleurs, les concepts et les outils de l'agronomie qui ont été forgés intéressent de plus en plus de publics. Dans l'enseignement agricole, les référentiels des diplômes d'enseignement général et technologique proposent des contenus en agronomie, car ils favorisent l'acquisition des compétences transversales en particulier via l'approche systémique, la réflexion interdisciplinaire, les relations sciences-société.

Poursuivre l'atelier « Enseignement » de la fabrique de l'agronomie

Dans l'ouvrage, le témoignage de cette construction de la discipline avec cette double dimension scientifique et technique, se prolonge ainsi par la mise en perspective de la discipline, du fait du contexte de tension et d'extension évoqué ci-dessus. Cela oblige les acteurs de l'enseignement, que ce soit l'enseignement supérieur, l'enseignement technique ou la formation professionnelle, à poursuivre leur contribution dans la suite de la fabrique de l'agronomie. Car, autant dans le besoin de capitalisation des nouveaux savoirs produits par la recherche (et ils vont être conséquents avec les grands programmes de recherche en cours) que dans la réorganisation conceptuelle des savoirs à enseigner, pour éviter de diluer le corpus des contenus d'enseignement, il va falloir viser des objectifs de formation qui intègrent toujours la double dimension scientifique et technique tout en les ciblant plus précisément vers les différents métiers mobilisant l'agronomie. Or, nous avons vu récemment, dans l'analyse de l'évolution des activités et des compétences des agronomes dans le contexte des transitions en cours, effectuée dans le cadre des derniers Entretiens agronomiques Olivier de Serres, que le besoin de former des agronomes pouvant répondre à une très grande variété de métiers est un enjeu pour le développement agricole des années à venir. Enfin, au-delà de la formation des agronomes, on peut aujourd'hui se poser la question de la place des concepts et outils de l'agronomie en dehors du système d'enseignement agricole du Ministère chargé de l'agriculture. Car les citoyens et les consommateurs n'ont qu'une conscience très partielle des connaissances nécessaires à la production agricole, et il serait certainement utile que des enseignants d'agronomie diffusent leurs connaissances parmi les publics scolaires.

Pour conclure, il est important de rappeler que l'association française d'agronomie propose un groupe de réflexion et de travail « capitalisation et transmission des savoirs agronomiques », et compte tenu des enjeux d'enseignement en agronomie dans les années à venir, tous les enseignants d'agronomie sont les bienvenus dans ce groupe !

L'agronomie au défi de nouveaux concepts et de nouveaux paradigmes

Après cette synthèse du chapitre « Construction de l'agronomie dans et par la formation » par les auteurs, A. Messéan, l'animateur de la séance, propose à N. Cancian, enseignante-chercheuse à l'ENSFEA, et à J. Wery, Directeur de la politique scientifique et partenariale de l'Institut Agro, tous deux enseignants d'agronomie, de donner leur point de vue sur l'atelier « Enseignement » de la fabrique de l'agronomie, et d'engager le débat.

Multi-référentialité des savoirs, risques et incertitudes (N. Cancian)

N. Cancian, après avoir remercié les auteurs pour la clarté de l'exposé et la richesse du chapitre dédié à l'enseignement, en particulier en proposant un parallèle des évolutions de l'enseignement entre enseignement supérieur, enseignement technique et formation continue, souhaite interpellé sur le caractère ambitieux de l'agronomie, par sa double dimension scientifique et technique, caractérisé par la mise en œuvre de pratiques agronomiques. Il est en effet important d'insister sur ce point car l'enseignement d'agronomie doit permettre de construire à la fois des modes à penser et des modes pour agir et qui en même temps s'ancrent dans du local, avec des savoirs qui peuvent être très locaux. Cette construction de la discipline d'enseignement est à plusieurs titres multi-référentielle et il faut se demander si l'agronomie actuelle reflète bien cette multi-référentialité.

D'une part, la mise en évidence de la forte dimension politique. Dans l'enseignement technique agricole, où les enseignants d'agronomie interviennent au plus près de la pratique agricole, la visée de transformation de l'agriculture interpelle l'agronomie, à la fois pour résoudre des problèmes qu'elle a pu encourager antérieurement et pour s'occuper de questions qui sont vitales aujourd'hui, comme le changement climatique et la perte de biodiversité. Cela met souvent en difficulté les enseignants quand ils veulent intégrer cette dialectique à différentes dimensions, celle de sa construction, entre le terrain et la théorie, celle des emboîtements d'échelle spatiale et temporelle (le « ici et maintenant », et les injonctions à agir très vite versus la carrière de l'agriculteur), celle entre des concepts endogènes structurants de la discipline d'enseignement et des concepts exogènes importés d'autres disciplines selon les thématiques, enfin celle entre l'étude fine des objets pour en comprendre le fonctionnement et celle de la vision globale pour comprendre la dynamique et en voir les effets.

D'autre part, l'agronomie est également soumise, que ce soit dans l'enseignement supérieur ou dans l'enseignement technique, à des injonctions conflictuelles et contradictoires. En effet, les enseignants doivent donner à évaluer ce qui fonctionne et ce qui pose problème. Cela pose la question du rapport au savoir, car les savoirs sont pluriels, ce qui demande une expertise plurielle. Cela pose aussi la question du nouveau rapport au vivant, car si le vivant cultivé a été très largement documenté, le vivant élargi au sauvage reste encore peu connu. Enfin se pose la question des risques et des innovations dans le contexte de la transition agroécologique. Quelles sont les innovations qui peuvent être structurantes pour développer cette discipline ? Ces questions des « rapports à... » (au savoir, à l'expertise, au vivant, aux innovations et aux risques) se posent avec une forte acuité car, pour la transition agroécologique, il faut qu'on construise chemin faisant des solutions, il faut outiller les acteurs qui vont transformer, comprendre, interpréter le monde d'aujourd'hui pour construire celui de demain. Donc il s'agit, via cette discipline, d'être en mesure de proposer une exposition des panoramas possibles, tout en étant assez engagé sur la dimension politique quant aux choix qu'il faudrait privilégier.

Paradoxalement, l'élargissement des objets d'étude, l'agroécosystème, la gestion des ressources naturelles, l'accompagnement du changement, peut engendrer la dilution de l'agronomie, mais elle peut inversement être incarnée dans ces nouveaux concepts. C'est ce que proposent aujourd'hui

les travaux en didactique où on part toujours d'une situation agricole, permettant de poser le problème à résoudre, pour ensuite penser l'outillage conceptuel et méthodologique qui est nécessaire pour résoudre le problème. Cela change la représentation de l'enseignant en agronomie, qui doit non seulement être solide sur le plan des références scientifiques, mais aussi sur le plan des modes à penser pour pouvoir outiller ses élèves. Pour l'agronomie dans l'enseignement technique, la production des référentiels métier, de formation, et de certification, produits en partenariat entre les enseignants et les inspecteurs pédagogiques, ainsi que la proposition de recommandations pour l'enseignement, ont permis de réfléchir à la place de la discipline, de ses objets et méthodes dans les différentes formations, en vue des métiers visés. L'agronomie est ainsi vue comme une discipline multi-référentielle, on pourrait dire presque « couteau suisse ». Avec le risque que le terme agronomie disparaisse au profit de ses concepts et outils, dans une rubrique de type « sciences et techniques agronomiques », voire « Sciences et techniques professionnelles ». La dialectique science, technique, technologie, opérationnalité pour agir et transformer, reste au cœur de cette multi-référentialité.

Pour conclure, N. Cancian souhaite interroger les auteurs sur la façon dont l'agronomie a, au fil du temps, pris en compte la question des risques, sujet important pour l'enseignement. Les risques ont pu être directement analysés par les agronomes dans les démarches et dans les produits, ou les risques ont été mis en exergue par d'autres acteurs et la société civile (cas des OGM ou des pesticides). Dans quelle mesure s'attache-t-on à travailler les risques et les incertitudes dans cette discipline pourrait contribuer à nourrir la construction de l'agronomie dans les années à venir ?

A propos de la multi-référentialité, P. Prévost rappelle l'importance de s'interroger sur la nature des savoirs à enseigner en agronomie. Avec la transition agroécologique, il y a différentes formes de rationalités dans la pratique agricole qui sont encore peu prises en compte dans la formation, même si les rénovations en cours des référentiels de formation y font référence. Chacun sait que dans la prise de décision de l'agriculteur, ce que fait le voisin ou les valeurs et les représentations mentales de l'agriculteur ont une importance majeure qui impactent le raisonnement agronomique et contribuent aux manières de faire. Les apprentissages ne peuvent donc pas ignorer ces déterminants de l'action que sont en particulier les savoirs de sciences humaines (sociologie, psychologie...).

T. Doré revient sur la question du risque. Il faut distinguer le risque pour l'agriculteur du risque pour la société. Le risque pour l'agriculteur a été intégré par les agronomes depuis plusieurs décennies, et un ouvrage est paru sur ce sujet dans les années 1990. L'accompagnement de l'agriculteur pour gérer le risque sur ses parcelles, son système de culture, son exploitation agricole, a été l'objet de nouveaux concepts en agronomie, comme le modèle d'action. En revanche, du côté du risque pour la société, cela dépend des objets auxquels s'intéressent les agronomes et de la manière dont les agronomes se saisissent ou non, de façon non neutre, d'objets comme le risque climatique, le risque de pollutions, le risque lié à la raréfaction des ressources, etc. Pour l'enseignement d'agronomie, intégrer ces objets fait évoluer les contenus d'enseignement mais aussi le caractère de neutralité, car l'enseignant d'agronomie n'est plus seulement alors le transmetteur de connaissances scientifiques, mais s'engage sur la mise en débat des orientations données à l'agriculture. Quand on choisit d'enseigner les systèmes de culture sans pesticides plutôt que les systèmes de culture avec pesticides, on fait un choix lié à la question du risque de l'emploi des produits phytosanitaires. Il faut donc distinguer la question épistémologique, puisque le concept de risque fait déjà partie des objets d'étude de l'agronomie, de la question d'éducation et de formation, quand on aborde le risque dans la société.

J.J. Gailleton complète ce propos en rappelant que la question du risque est aussi à situer dans le fonctionnement pédagogique, car le système scolaire n'encourage pas beaucoup le risque, par la sanction de l'erreur et une mauvaise prise en compte du rôle des erreurs dans la construction des

apprentissages. La prise de risque doit donc faire partie des apprentissages. En agronomie, le risque bien fait partie des objets d'enseignement, avec une évolution dans le temps. Dans les années 1980-1990, la notion de risque a été traitée via les seuils d'intervention dans les cultures (lutte intégrée, outils d'aide à la décision, bilan) mais toujours dans un pilotage tactique selon une approche essentiellement technico-économique. Un changement important a été le développement des systèmes de culture à bas niveau d'intrants, avec une approche de pilotage stratégique visant à réduire les risques extérieurs. Et le développement de l'approche multicritère a engendré une approche du risque par le compromis entre différents objectifs. Et très récemment, les référentiels de formation, en particulier dans les BTS, la double approche « risques pour l'agriculteur » et « risques pour la société » est bien prise en compte, tant dans la conception de systèmes de culture, que dans l'analyse des conséquences de trajectoires différenciées d'évolution des pratiques.

N. Cancian souhaite ajouter qu'au-delà du risque, une dimension aujourd'hui importante est l'incertitude, puisque le risque se situe désormais dans un contexte de plus en plus incertain, en particulier avec le dérèglement climatique. Il est donc important d'aller au-delà du risque dans l'enseignement, pour travailler sur les incertitudes, sur les savoirs, sur les effets des pratiques, sur les acteurs, mais également sur les incertitudes de l'incertitude (référence à la thèse de doctorat de L. Nedellec). Il y a alors une dimension politique et une dimension éthique qu'il faut savoir traiter dans l'enseignement.

L'agronomie, discipline académique ou espace transdisciplinaire (J. Wery)

J. Wery, qui a apprécié cette synthèse de cette longue et riche histoire de l'enseignement d'agronomie, déclinée aussi bien dans l'enseignement supérieur, l'enseignement technique et dans l'appui aux politiques publiques, commence son propos en conseillant la lecture du chapitre, pour aller encore plus loin que ce qui a été présenté. En particulier, il n'est pas apparu clairement dans la présentation un élément présent dans l'ouvrage concernant l'évolution de l'agronomie dans ses concepts et dans ses orientations : l'aspect multi-critères. Dans les années 1990, les agronomes sont sortis d'une approche d'évaluation des systèmes de culture par le seul rendement, pour l'élargir à de nombreux autres critères liés au travail, au revenu, aux impacts environnementaux. L'agronomie a été pionnière en France dans cette approche par rapport aux autres disciplines, et on a parfois tendance à l'oublier, en particulier dans les écoles où les enseignants d'agronomie sont considérés avant tout comme les spécialistes de la production et du rendement.

Pour revenir à l'exposé, J. Wery se reconnaît bien dans cette histoire de l'enseignement d'agronomie, car il a été lui-même recruté comme enseignant de phytotechnie en 1981. Et lorsqu'il a voulu enseigner l'agronomie et diriger des thèses, il a dû passer une HDR (habilitation à diriger des recherches) en physiologie végétale. Jusqu'à une période récente, s'il n'y avait pas de frein à soutenir une HDR pour les enseignants-chercheurs en agronomie, il n'existait que peu d'endroits où passer une HDR en agronomie. Et plus récemment, dans une posture d'intégration de savoirs dans des approches systémiques, son enseignement a surtout porté sur les systèmes agricoles, qui oblige à élargir les situations de formation à d'autres disciplines que l'agronomie. Aussi, les perspectives pour la discipline agronomique présentées dans le chapitre sont importantes à approfondir, car la période actuelle re-questionne la discipline autant en recherche qu'en formation ou dans les processus d'innovation. Dans un paysage en forte reconfiguration, il est essentiel que l'agronomie s'interroge sur son statut de discipline scientifique et de discipline pour l'action. Pour ne citer qu'un exemple, l'innovation est aujourd'hui très orientée vers l'innovation technologique autour du numérique, sujet pour lequel les agronomes sont assez peu présents, et on voit que le caractère d'analyse systémique, multi-critères et multi-échelles de l'agronomie a tendance à disparaître dans ces processus d'innovation. Ainsi, le risque est grand que ces innovations ne soient pas mises au service de la transition agroécologique, par manque de cette approche systémique que maîtrisent les agronomes.

La question qu'il souhaite discuter porte sur ce caractère dual de l'agronomie si difficile à maintenir et qui fragilise l'agronomie en tant que discipline académique. Car si l'agronomie a gagné ses galons de discipline académique, son orientation vers l'action et son caractère intégratif de ce qui se passe dans d'autres disciplines lui confèrent un certain rôle social d'intégration des autres disciplines au risque d'une certaine dispersion. Dans les écoles d'agronomie, l'enseignement d'agronomie intègre d'autres disciplines comme la science du sol, l'écologie ou la protection des cultures, tout en contribuant à les faire évoluer, et elle est également souvent un espace interdisciplinaire voire transdisciplinaire dans lequel elle joue un rôle important, mais souvent au risque de disparaître. Plusieurs exemples, vécus dans sa carrière, attestent ce risque :

- L'agronomie a permis à l'écophysiologie de prendre son envol dans les années 1990, ce qui a eu pour conséquence de remplacer des enseignants d'agronomie par des enseignants d'écophysiologie, et lorsque l'écophysiologie s'est orientée vers la biologie moléculaire, cela a créé un manque d'enseignants d'agronomie pour traiter de la science pour l'action ;
- Dans un autre contexte, dans les années 2000, la volonté de réduction des produits phytosanitaires a fait fortement évoluer les métiers d'agronomes et l'enseignement a développé des cursus de formation fondés sur la conception de systèmes de culture intégrant la gestion des bioagresseurs, ce qui a obligé l'agronomie à re-fonder sa légitimité par des collaborations avec la biologie et la protection des cultures ;
- Et depuis les années 2010, avec le développement de l'agroécologie, beaucoup d'enseignants et de chercheurs se tournent vers les concepts de l'écologie, délaissant la dimension science pour l'action de l'agronomie et on peut se demander si on va continuer à recruter des enseignants d'agronomie, au profit d'enseignants en agroécologie.

Il souhaite donc savoir comment les auteurs voient l'avenir de l'agronomie dans l'enseignement, alors que les enjeux actuels obligent à intégrer de nouveaux objets, donc de nouveaux concepts et outils. Peut-elle garder un statut de discipline académique en le renforçant, ou n'est-ce pas plutôt un rôle d'espace transdisciplinaire, systémique, qui est plastique, suffisamment agile pour évoluer en fonction des enjeux et de l'avancée des autres disciplines. Pour reprendre le cas du numérique, avec le développement de l'intelligence artificielle, les nouveaux champs de savoirs sont très éloignés des écoles d'agronomie (qui par ailleurs utilisent toujours le terme dans son acception au sens large), et pour autant essentiels pour les agronomes de la production végétale. Quelle place de ce nouveau champ de savoirs dans la formation agronomique ?

T. Doré, en réponse à cette question, considère qu'il n'est pas contradictoire d'avancer dans la construction d'une discipline académique tout en allant vers l'acceptation d'être un espace transdisciplinaire. L'essentiel est de ne pas perdre ce qui fait la richesse de l'agronomie, à savoir la dimension multi-critères et multi-échelles, et la double dimension « science pour produire les connaissances » et « d'ingénierie pour valoriser les connaissances dans des raisonnements agronomiques ». En positionnant l'agronomie exclusivement comme espace transdisciplinaire, il y a un risque de perdre les dimensions constitutives de l'agronomie. Ce ne serait peut-être pas grave dans l'histoire des sciences, mais ce le serait du point de vue de l'utilité présente de notre discipline pour la société. Nous voyons trop de situations, par exemple en agroécologie, où l'on mêle les disciplines, où on utilise les concepts de l'écologie, mais en oubliant complètement la dimension systémique, le fonctionnement du champ cultivé, les règles d'action des agriculteurs et des autres acteurs, et c'est dommageable. Il semble donc essentiel de préserver les éléments qui ont fait la preuve de la richesse de l'agronomie et son efficacité.

J.J. Gailleton complète en précisant que, dans l'enseignement technique, l'enseignant d'agronomie doit approcher les objets d'enseignement complexes en mobilisant déjà des notions de sciences sociales, et la longue expérience de la pluridisciplinarité permet de fortes interactions entre enseignants pour traiter des objets transdisciplinaires, comme le développement local ou le changement climatique. Et dans les nouveaux référentiels, construits à partir d'objectifs de

capacités et de blocs de compétences, le travail d'ingénierie pédagogique nécessaire au sein des équipes d'enseignants est très important. Cela rend le métier plus difficile mais plus riche également.

P. Prévost rappelle que, par ailleurs, le système d'enseignement technique est organisé avec des disciplines académiques, des enseignants qui portent un corpus de concepts et d'outils, et des référentiels de formation avec des syllabus et des volumes horaires affectés. Lorsque nous avons analysé les référentiels de formation en agronomie dans les écoles supérieures, publiques et privées, nous avons pu analyser le fort lien entre la présence d'enseignants d'agronomie, les contenus d'enseignement et le volume disponible de temps étudiant dans le cursus. Et si on prend l'exemple de l'enseignement secondaire, avec la volonté de développer des « Educations à... » (à l'environnement, à la santé, à l'alimentation...), on a pu voir que sans intégration dans un emploi du temps et sans disciplines affectées, les enseignements inter ou transdisciplinaires ne sont pas prioritaires.

F. Papy, représentant la partie 1 (la dynamique scientifique) de l'ouvrage, réagit à cet échange à propos du risque de dilution de l'agronomie. Dès lors que la discipline est définie autour de la culture des végétaux, les objets d'étude restent bien circonscrits. Les agronomes doivent cependant contribuer à résoudre l'ensemble des problèmes impliquant l'agriculture. En effet, dans leur domaine bien défini, parce qu'ils savent connecter l'analyse des multiples raisons qui incitent à l'action de cultiver à celle des multiples conséquences qui s'en suivent, les agronomes peuvent, sans hésiter, aborder, avec d'autres, les problèmes évoqués plus haut (alimentation, environnement, santé) aux différentes échelles d'action. C'est un plaidoyer pour défendre l'agronomie au sens restreint comme une discipline de l'action (définition de l'AFA).

Les enseignants d'agronomie, médiateurs entre les mondes académique, professionnel et sociétal

A l'issue de cette première discussion, A. Messéan relaie deux questions des participants au webinaire qui permettent d'aller un peu plus loin dans le rôle de l'enseignement dans la construction de l'agronomie :

- Quelle est la capacité de l'enseignement agricole technique et supérieur à s'inscrire dans les projets territoriaux et nationaux pour jouer le rôle de porte-parole de l'enseignement vers les professionnels du monde agricole ?
- Comment maintenir la tension entre l'adaptation des contenus d'enseignement et l'outillage des élèves pour une prise de recul face à certains discours ?

Pour répondre à la première question, P. Prévost rappelle qu'il existe déjà de nombreux dispositifs où les enseignants peuvent s'exprimer, que ce soit dans les réseaux mixtes technologiques (RMT), les unités mixtes technologiques (UMT), ou différents projets régionaux, et cette dynamique du lien recherche-formation-développement-professionnels agricoles se renforce dans tous les territoires dans le contexte de la transition écologique, compte tenu d'un besoin accru d'acquisition de nouveaux savoirs issus de la recherche. J.J. Gailleton complète cette réponse en précisant que la majorité des exploitations des lycées agricoles jouent également ce rôle d'interface entre la recherche et la profession agricole à l'échelle locale. En revanche, un enjeu actuel est le partage et l'appropriation des savoirs. Beaucoup de ressources existent mais seuls les enseignants qui contribuent à la production de ressources ou aux réseaux type RMT ont acquis la capacité de remobiliser les nouveaux savoirs dans leur pratique d'enseignement.

Quant à la seconde question, N. Cancian insiste sur le rôle que joue l'étude des questions de société avec les concepts et outils de la didactique des questions socialement vives (à la fois dans les savoirs de référence et dans la société). Ces objets d'enseignement bousculent à la fois les enseignants et les élèves et contribuent à cette prise de recul sur les argumentations opposées issues de différents mondes. Beaucoup de questions actuelles concernent l'agronomie (agroécologie, sortie des

pesticides, etc.) et l'approche de ces questions permet à la fois d'entrer dans la complexité de l'objet, d'analyser le problème et de construire des solutions au problème à partir d'un travail de documentation et d'analyse, tout en acquérant des savoirs stabilisés et en prenant du recul sur les savoirs non stabilisés.

T. Doré, de son côté, considère que, pour l'agronomie, la diversité des orientations de l'agriculture ou de l'utilisation de l'espace est une voie essentielle pour l'enseignement. Celle-ci peut se poser différemment pour l'enseignement supérieur et l'enseignement technique. Dans l'enseignement secondaire, les référentiels nationaux de formation ne donnent pas la même liberté que dans l'enseignement supérieur. Dans l'enseignement technique, le risque qu'il y ait un enseignement de l'ignorance, comme il y a une construction de l'ignorance, parce que l'on enseigne exclusivement une orientation particulière, n'est pas négligeable si l'on n'y prend pas garde (mais l'inspection pédagogique permet d'éviter ce risque). Dans l'enseignement supérieur, ce sont aux collectifs d'enseignants-chercheurs et aux responsables d'établissements de veiller à préserver une diversité suffisante dans les enseignements offerts, à la fois disciplinaires mais aussi dans la façon d'aborder les enjeux et les conséquences des différentes orientations de l'utilisation de l'espace agricole.

En conclusion, A. Messéan retient trois éléments majeurs de cet échange autour de la construction et du déploiement de l'agronomie dans la formation, qui mériteront de poursuivre la réflexion dans les années à venir, en particulier au sein de l'AFA :

- La tension entre la discipline et l'espace transdisciplinaire,
- La question de l'incertitude, qui bouleverse certes l'enseignement, mais également tout le système de production et de partage des savoirs (recherche, développement, pratique agricole) ;
- L'approche de la diversité des modèles agricoles.

Références

Boiffin, J., Doré, T., Kockmann, F., Papy, F., Prévost, P., 2022. *La fabrique de l'agronomie*. Quae Ed., Versailles, 496p.

Prévost, P., Messéan, A., Capitaine, M., Busnel, J., Michel., A., 2022. Des compétences individuelles à la compétence collective des agronomes pour accompagner la transformation de l'agriculture. In *Etre agronome en contexte de transitions, Agronomie, environnement et sociétés*, Volume 12 numéro 2, <https://agronomie.asso.fr/aes-12-2-21>